

Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований

№ 121111900090-5



УТВЕРЖДАЮ

Директор института

В.Г. Трубников

См

23»

января 2024 г.

О Т Ч Е Т

о выполненных работах по реализации исследовательской
программы (проекта)

по теме:

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
СТАНЦИЙ НА ИСТОЧНИКАХ НЕЙТРОНОВ ИМПУЛЬСНОГО ИЛИ
ПОСТОЯННОГО ТИПА

(заключительный)

Федеральная научно-техническая программа развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 – 2027 годы

Соглашение о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидии от 13 октября 2021 г. № 075-10-2021-115 (внутренний номер СиН.21.0021)

Руководитель исследовательской программы (проекта),

Начальник ОНИРКС ЛНФ ОИЯИ,
д-р физ.-мат. наук

подпись, дата

А.В. Белушкин
23.01.2024

А.В. Белушкин

Дубна 2024

СПИСОК СОИСПОЛНИТЕЛЕЙ

№	Название организации	Руководитель работ
1.	Государственный университет «Дубна»	О.И. Пискунова Директор Инженерно-физического института Государственного университета «Дубна», кандидат технических наук
2.	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»	М.Р. Гафуров Директор Института физики, доктор физико-математических наук
3.	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»	А.В. Рогачев Ведущий научный сотрудник, Кандидат физико-математических наук
4.	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»	Е.В. Алтынбаев И.О. Зам. Зав. ОДНИ ИЦ НТ, кандидат физико-математических наук
5.	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской Академии наук	Р.А. Садыков И.О. Зав. Сектора конденсированных сред, ЛНИ, ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук
6.	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук	Е.А. Кравцов Главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук

РЕФЕРАТ

Сцинтилляционный счетчик, позиционно-чувствительный детектор, одномерный детектор, сцинтиллятор, прототип счетчика, твердотельный конвертор, газоразрядный модуль, магнетронное напыление, Монте-Карло моделирование, нейтронный фильтр, нейтронное рассеяние, поляризованные нейтроны, нейтроновод, прерыватель пучка, дифрактометрия, рефлектометрия, малоугловое рассеяние, высокопоточный источник нейтронов, метод времени-пролета, сверхрешетка, намагниченность, характеристика тонких пленок, фотоумножитель, контроллер-управления, наноструктуры, световод, фазовая проблема, вторичное излучение, гамма-излучение

В отчете содержатся сведения о проведенных исследованиях, работах и процессе подготовки молодых специалистов, за три этапа исследовательского Проекта «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа» Отчет состоит из 3-х томов: первый том содержит отчет о результатах 1-го этапа Проекта (2021 г.); второй том содержит отчет о результатах 2-го этапа Проекта (2022 г.); третий том содержит отчет о результатах 3-го этапа Проекта (2023 г.). В каждом из томов приведено описание результатов выполнения работ по каждому пункту плана-графика соответствующего этапа реализации Проекта со списком приложений, содержащих подтверждающие документы. В выполнении Проекта на протяжении всех 3-х этапов принимали участие 7 научных и образовательных организаций:

1. Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований – головная организация проекта
2. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
3. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской Академии наук
4. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук
5. Государственный университет «Дубна»
6. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
7. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

СОДЕРЖАНИЕ

- ВВЕДЕНИЕ

- ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

- Том I. Отчет за 1 этап (2021 г)

- Том II. Отчет за 2 этап (2022 г)

- Том III. Отчет за 3 этап (2023 г)

- ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Ключевые слова: сцинтилляционный счетчик, позиционно-чувствительный детектор, одномерный детектор, сцинтиллятор, прототип счетчика, твердотельный конвертор, газоразрядный модуль, магнетронное напыление, Монте-Карло моделирование, нейтронный фильтр, нейтронное рассеяние, поляризованные нейтроны, нейтроновод, прерыватель пучка, дифрактометрия, рефлектометрия, малоугловое рассеяние, высокопоточный источник нейтронов, метод времени-пролета, сверхрешетка, намагниченность, характеристика тонких пленок, фотоумножитель, контроллер-управления, наноструктуры, световод, фазовая проблема, вторичное излучение, гамма-излучение.

Цель работы – проведение синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач, в том числе: поддержка научных и научно-технических проектов, выполняемых организациями, в том числе совместно с организациями, действующими в реальном секторе экономики, представителями международного научного сообщества, а также проектов исследователей в возрасте до 39 лет; поддержка разработки и трансфера прорывных технологий, созданных с использованием результатов синхротронных и нейтронных исследований, а также ускорительных, реакторных и ядерных технологий, в том числе в рамках развития ядерной медицины. Подготовка специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня, в том числе: разработка и реализация образовательных программ высшего образования и дополнительных профессиональных программ, направленных на создание прорывных технологических решений с применением синхротронных и нейтронных источников; организация и проведение научных конференций, школ и семинаров для исследователей и обучающихся по направлениям реализации Федеральной программы в возрасте до 39 лет.

В 2023 году был закончен последний третий этап проекта «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа». В проекте принимали участие коллективы ведущих научно-исследовательских и образовательных центров Российской Федерации. Головной организацией проекта выступила Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований. Соисполнителями проекта стали: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, Государственный университет «Дубна», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет", Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)». Участники проекта поставили перед собой амбициозные цели по разработке и созданию уникального оборудования для станций нейтронного рассеяния, разработке и внедрению образовательных программ для подготовки кадров, которым предстоит работать в нейтронных центрах и применять полученные знания на практике, наладить сотрудничество с предприятиями реального сектора экономики для разработки оборудования, способного внести вклад в развитие производственного процесса и создание спроса на оборудование, разработанное в ходе выполнения проекта. Значительные усилия были потрачены на развитие исследовательской инфраструктуры, что позволило создать с нуля научно-экспериментальный участок по разработке и испытанию детекторов тепловых нейтронов. Реализация этого проекта создает задел на многие годы вперед для успешного выполнения научно-технических и исследовательских задач по разработке, созданию и внедрению детекторов тепловых нейтронов разного типа для практически любой станции нейтронного рассеяния, которые работают в нейтронных центрах Российской Федерации. В общей сложности за три года было освоено 366 млн. руб. бюджетных средств и около 37 млн руб., привлеченных из внебюджетных источников. За время выполнения проекта вышло 28 публикаций, получено 8 патентов, что превышает пороговые значения показателей. Важная часть проекта была

посвящена подготовке молодых кадров для работы по специальностям, связанным с исследованиями, проводимыми с помощью рассеяния нейтронного излучения. На базе трех образовательных учреждений разработаны и внедрены образовательные курсы, по которым в общей сложности прошли обучение более 250 студентов и аспирантов. В 2021/2022 учебном году МФТИ по итогам конкурсного отбора получил право на проведение Всероссийской олимпиады студентов «Я – профессионал» по четырем направлениям, включая направление «Физика и технологии уникальных научных установок класса «мегасайенс», позволит студентам, заинтересованным в дальнейшей научной карьере, продолжить образование в вузах РФ, развивающих тематику исследований на установках «мегасайенс», и начать работу в составе научных коллективов таких организаций как ОИЯИ, ФИАН, ТРИНИТИ, НИЦ КИ, ИК СО РАН, ИЯИ РАН и др., а также в лабораториях МФТИ, НГУ и других университетов. На каждом из этапов выполнения проекта проводилась научно-практическая конференция для молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред». В конференциях приняли участие молодые ученые, студенты и аспиранты из ведущих вузов и научных центров Российской Федерации. Конференция хорошо зарекомендовала себя среди профессионального сообщества и в настоящее время идет работа по приданию конференции статуса ежегодной.

Основная научно-исследовательская часть проекта состояла в разработке новых детекторов тепловых нейтронов для станций нейтронного рассеяния в нейтронных центрах Российской Федерации. Ставилась задача по созданию детекторов, обладающих рекордными характеристиками по пространственному, временному разрешению и скорости счета. По итогам выполнения проекта были разработаны и изготовлены детекторы разных типов. На основе сцинтиллятора $ZnS/{}^6LiF$ разработан позиционно-чувствительный счетчик, для дифрактометра «СФЕРА» на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС в ИЯИ РАН разработаны и изготовлены многослойные детекторы нейтронов на основе того же сцинтиллятора. Разработана и создана двумерная позиционно-чувствительная многопроволочная камера апертурой не менее $200 \times 200 \text{ мм}^2$ с пространственным разрешением не менее $2 \times 2 \text{ мм}^2$ с поканальной регистрацией сигнала.

В рамках выполнения проекта разработана технология нанесения тонкопленочных покрытий из карбида бора B_4C на различные основания: алюминиевые пластины и фольги, на полимерные пленки с высокой температурой плавления – полиимид и лавсан. На основе конвертера из карбида бора разработаны и созданы газоразрядный модуль с активной площадью не менее $100 \times 100 \text{ мм}^2$, пространственным разрешением не хуже $1.5 \times 1.5 \times 0.05 \text{ мм}^3$, а также новый тип детекторов типа «строу-трубка», который ранее не использовались на станциях нейтронного рассеяния.

Изготовлен и испытан газовый позиционно-чувствительный детектор с резистивной нитью с конвертером из 3He для применения на высокопоточных импульсных источниках нейтронов. Характеристика полученного детектора по пространственному разрешению не уступает мировым аналогам подобного рода детекторов.

В рамках выполнения проекта выполнен крупный инфраструктурный проект создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий. Были переоборудованы почти 500 кв. м. площадей под создание современной лаборатории, оснащенной передовым оборудованием для разработки и создания детекторов тепловых нейтронов на основе конвертера из тонкопленочного карбида бора B_4C . ОЭУ включает в себя чистые помещения с напылительной установкой магнетронного типа, помещения для подготовки подложек, комнаты для проведения тестовых измерений с портативным источником тепловых нейтронов. В 2023 г. ОЭУ был введен в эксплуатацию, и в 2024 г. должны начаться работы по изготовлению детекторов, как в исследовательских целях, так и по заказам от различных нейтронных центров Российской Федерации. Тестовые образцы детекторов, полученных в ходе выполнения проекта, вызвали большой интерес со стороны нескольких научных центров. В настоящее время ведутся обсуждения о создании нескольких детекторов из числа разработанных в ходе реализации проекта для станций нейтронного рассеяния в различных нейтронных центрах Российской Федерации.

В рамках проекта были выполнены научно-исследовательские работы по изучению свойств материалов, используемых или перспективных для использования в детекторных технологиях. Было спроектировано исследовано и изготовлено устройство «Механический фильтр нейтронного пучка», которое способно значительно улучшать фоновые условия нейтронного эксперимента, особенно на источнике нейтронов импульсного типа

В ходе реализации проекта было налажено плодотворное сотрудничество с предприятием реального сектора экономики с АО НИИТФА, входящей в Госкорпорацию «Росатом». Используя разработанную технологию напыления пленок карбида бора на алюминиевые поверхности совместно со специалистами АО НИИТФА были изготовлены счетчики нейтронов. Было проведено сравнительное исследование чувствительности пропорциональных счетчиков тепловых нейтронов с покрытием катода, выполненным по двум технологиям: нанесения суспензии бора аморфного (используемого в НИИТФА), а также магнетронного нанесения карбида бора. Предприятие выразило заинтересованность в дальнейшем сотрудничестве и использовании детекторов нейтронов, изготовленных по разработанным в рамках проекта технологиям в производственных целях.

TOM I

№ 121111900090-5



УТВЕРЖДАЮ

Директор института

В.Г. Трубников

« 30 » декабря 2021 г.

О Т Ч Е Т О ВЫПОЛНЕНИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОГРАММЫ (ПРОЕКТА)

по теме:

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЭЛЕМЕНОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
СТАНЦИЙ НА ИСТОЧНИКАХ НЕЙТРОНОВ ИМПУЛЬСНОГО ИЛИ
ПОСТОЯННОГО ТИПА

(промежуточный)

Этап 1

Федеральная научно-техническая программа развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 – 2027 годы

Соглашение о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидии от 13 октября 2021 г. № 075-10-2021-115 (внутренний номер СиН.21.0021)

Руководитель проекта,
д-р физ.-мат. наук

подпись, дата

30.12.2021 г.

А.В. Белушкин

Дубна 2021

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель
исследовательской
программы (проекта),
д-р физ.-мат. наук



подпись

А.В.Белушкин

Исполнитель проекта,
старший научный
сотрудник



подпись

А.А. Богдзель

Исполнитель проекта,
Начальник отдела
НЭОКС ИБР-2, к-т
физ.-мат. наук



подпись

В.И. Боднарчук

Исполнитель проекта
Нач. группы , к-т физ.-
мат. наук



подпись

И.В.Гапон

Исполнитель проекта,
заместитель директора
по научной работе, к-т
физ.-мат. наук



подпись

Е.В.Лычагин

Исполнитель проекта,
старший инженер



подпись

А.Г.Колесников

Исполнитель проекта,
начальник сектора, к-т
физ.-мат. наук



подпись

В.М.Милков

Исполнитель проекта,
м.н.с.



подпись

В.В.Садиллов

Исполнитель проекта,
с.н.с.



подпись

А.В.Чураков

Исполнитель проекта,
инженер



подпись

В.В.Баутин

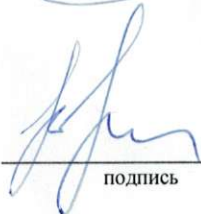
Исполнитель проекта,
Научный сотрудник



подпись

К.М.Саламатин

Исполнитель проекта,
В.н.с., д-р физ.-мат.
наук



подпись

Б.Ж.Залиханов

Исполнитель проекта,
лаборант



подпись

Т.В.Милкова

Исполнитель проекта,
ст.инженер



подпись

А.В. Алтынов

Исполнитель проекта,
мнс



подпись

М.О. Петрова

Исполнитель проекта,
лаборант



подпись

Н.Н. Богомолова

Исполнитель проекта,
лаборант



подпись

О.Н. Богомолова

Исполнитель проекта,
ведущий инженер



подпись

А.П. Буздавин

Исполнитель проекта,
ст.инженер



подпись

В.В. Булавина

Исполнитель проекта,
ведущий инженер



подпись

К.В. Булатов

Исполнитель проекта,
лаборант физ.лаб.



подпись

О.В. Володин

Исполнитель проекта,
инженер



подпись

О. Даулбаев

Исполнитель проекта,
ведущий инженер



подпись

В.А. Дроздов

Исполнитель проекта,
лаборант



подпись

О.В. Ермолаева

Исполнитель проекта,
ведущий инженер



подпись

В.В. Журавлев

Исполнитель проекта,
инженер



подпись

Н.Д. Зернин

Исполнитель проекта,
К.н., начальник группы



А.С. Кирилов

Исполнитель проекта,
инженер



П.А. Кислицын

Исполнитель проекта,
лаборант физ.лаб.




И.В. Ковалев

Исполнитель проекта,
инженер-электроник



М.Л. Коробченко

Исполнитель проекта,
научный сотрудник




А.К. Курилкин

Исполнитель проекта,
снс




Е.И. Литвиненко

Исполнитель проекта,
старший инженер



Г.Е. Малькова

Исполнитель проекта,
ведущий инженер



И.А. Морковников

Исполнитель проекта,
инженер-программист
1 кат.



С.М. Мурашкевич

Исполнитель проекта,
инженер-программист
1 кат.



Т.Б. Петухова

Исполнитель проекта,
МНС



М.М. Подлесный

Исполнитель проекта,
ВНС




В.И. Приходько

Исполнитель проекта,
инженер



А.В. Семечкин

Исполнитель проекта,
лаборант



А.Ч. Сопубекова

Исполнитель проекта,
ведущий инженер



Г.А. Сухомлинов

Исполнитель проекта,
инженер-электроник




М.В. Тихонов

Исполнитель проекта,
старший инженер



Л.А. Трунтова

Исполнитель проекта,
старший лаборант



Ф.А. Червяков

Исполнитель проекта,
СНС



А.Н. Черников

Исполнитель проекта,
инженер-электроник



В.В. Швецов

Исполнитель проекта,
инженер



подпись

Н.В. Швецов

Исполнитель проекта,
лаборант



подпись

К.Р. Ширинов

Исполнитель проекта,
инженер-электроник 1
кат.



подпись

В.К. Широков

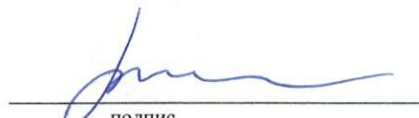
Исполнитель проекта,
начальник группы



подпись

А.И. Куклин

Исполнитель проекта,
МНС



подпис

А.О. Колесников

Исполнитель проекта,
СНС



подпись

Р.В. Эрхан

СПИСОК СОИСПОЛНИТЕЛЕЙ

№	Название организации	Руководитель работ
1.	Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Университет «Дубна» (Государственный университет «Дубна»)	Е.А. Давыдов Доцент, кандидат физико-математических наук
2.	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»	М.Р. Гафуров Директор Института физики, доктор физико-математических наук
3.	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»	Т.Л. Еник Заведующий лабораторией Ведущий научный сотрудник кандидат физико-математических наук
4.	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»	Е.В. Алтынбаев И.О. Зам. Зав. ОДНИ ИЦ НТ, кандидат физико-математических наук
5.	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской Академии наук	Р.А. Садыков И.О. Зав. Сектора конденсированных сред, ЛНИ, ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук
6.	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н.Михеева Уральского отделения Российской академии наук	Е.А. Кравцов Главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	13
ВВЕДЕНИЕ	14
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	19
1.1.1. Исследование влияния режимов технологического процесса вакуумного магнетронного распыления на характеристики плёнки карбида бора B_4C , осаждаемой на металлические подложки (алюминиевые листы, пластины из нержавеющей стали, алюминиевая и медная фольга)	19
1.1.2 Разработка конструкции магнетрона, имеющего высокий коэффициент использования материала мишени – карбида бора $^{10}B_4C$, с применением программного пакета Elcut и программного пакета Pretarget для моделирования магнитной системы магнетрона и прогнозирования коэффициента использования мишени	31
1.1.3 Тестовые нанесения карбида бора $^{10}B_4C$ на полимерные плёнки из лавсана (Mylar) и полиимида (Kapton)	48
1.1.4 Реконструкция вакуумной напылительной системы VSR300 под магнетронное нанесение $^{10}B_4C$ на рулонные материалы из полимерных плёнок и металлической фольги	51
1.1.5 Газовый детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B_4C на алюминиевой подложке	55
1.1.6 Позиционно-чувствительный мониторинг детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B_4C (1 очередь)	59
1.1.7 Газовый позиционно-чувствительный детектор с резистивной нитью для применения на высоко-поточных импульсных источниках нейтронов (1 очередь)	64
1.1.8 Теоретические и экспериментальные исследования по определению оптимальной конструкции регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером (совместно с НИЦ КИ ПИЯФ)	69
1.1.9 Создание прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов	102

ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей (совместно с НИЦ КИ ПИЯФ)	
1.1.10 Моделирование и расчет оптимальных параметров детекторов (совместно с ИЯИ РАН)	109
1.1.11 Изготовление кольцевого детектора нейтронов для дифрактометра «СФЕРА» (1 часть) (совместно с ИЯИ РАН)	124
1.1.12 Синтез, структурная и магнитная характеристика тонких пленок и планарных наноструктур на основе гадолиния (совместно с ИФМ УО РАН)	127
1.1.13 Теоретическое исследование отражения нейтронов от тонких пленок и слоистых наноструктур, содержащих сильнопоглощающие изотопы гадолиния и бора (молодые исследователи ИФМ УО РАН).	134
1.1.14 Синтез, структурная и магнитная характеристика наногетероструктур MgO (молодые исследователи ИФМ УО РАН)	146
1.1.15 Разработка конструкции блока детекторов для дифрактометра «СФЕРА» (молодые исследователи ИЯИ РАН).	167
1.1.16 Разработка и изготовление высокоэффективного сцинтилляционного счетчика тепловых нейтронов в части (совместно с ИЯИ РАН)	173
1.2.1 Создание опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных бор содержащих покрытий (Очередь 1)	176
1.3.1 Разработка программы дополнительного профессионального образования (повышения квалификации) "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для специалистов естественнонаучного профиля (совместно с К(П)ФУ)	178

1.3.2 Разработка программы дополнительного профессионального образования (повышения квалификации)"Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для специалистов биомедицинского профиля (совместно с К(П)ФУ)	194
1.3.3 Создание научно-образовательной лаборатории для проведения научно-исследовательские работы студентов и аспирантов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также элементов и систем экспериментальных станций (совместно с МФТИ)	195
1.3.4 Формирование перечня научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно- образовательной лаборатории в 2022 г. (совместно с МФТИ)	198
1.3.5 Ресурсное и инфраструктурное обеспечение в 2021г. научно--образовательной лаборатории для реализации выполнения научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории (совместно с МФТИ)	207
1.3.6 Реализация образовательной программы для подготовки специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня»: Модуль 1 «Нейтронные детекторы» Модуль 2 «Прикладная нейтронная физика» Модуль 3 «Проектирование интеллектуальных систем» Модуль 4 «Электроника и автоматика физических установок» (совместно с Унив. «Дубна»)	209
1.3.7 Проведение в 2021г. конференции обучающихся и исследователей в возрасте до 39 лет по тематике исследований (совместно с Унив. «Дубна»)	224
1.3.8 Разработка программы дополнительного профессионального образования (повышения квалификации) «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов археологического профиля (совместно с К(П)ФУ)	231
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	232

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВМ	- Вибрационная магнитометрия
ВМР	- Высоковакуумное магнетронное распыление
КД	- конструкторская документация
мкм	- микрометр, 1 мкм = 0,001 мм
ММН	- Многослойные магнитные наноструктуры
ОПЧД	- одномерный позиционно-чувствительный детектор
ПГ	- план-график
ПМ	- программа и методики испытаний
ПНР	- Рефлектометрия поляризованных нейтронов
ПО	- программное обеспечение
РД	- Рентгеновская дифрактометрия
РЗМ	-Редкоземельный металл
РР	- Рентгеновская рефлектометрия
ТЗ	- техническое задание
XPS	- Фотоэлектронная спектроскопия
ILL	- Институт Лауэ-Ланжевена
Å	- ангстрем, внесистемная единица длины, равная 0.1 нм
λ	- длина волны, измеряется в ангстремах

ВВЕДЕНИЕ

Ключевые слова: сцинтилляционный счетчик, позиционно-чувствительный детектор, одномерный детектор, сцинтиллятор, прототип счетчика, твердотельный конвертор, газоразрядный модуль, магнетронное напыление.

Цель работы – проведение синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач, в том числе: поддержка научных и научно-технических проектов, выполняемых организациями, в том числе совместно с организациями, действующими в реальном секторе экономики, представителями международного научного сообщества, а также проектов исследователей в возрасте до 39 лет; поддержка разработки и трансфера прорывных технологий, созданных с использованием результатов синхротронных и нейтронных исследований, а также ускорительных, реакторных и ядерных технологий, в том числе в рамках развития ядерной медицины. Подготовка специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня, в том числе: разработка и реализация образовательных программ высшего образования и дополнительных профессиональных программ, направленных на создание прорывных технологических решений с применением синхротронных и нейтронных источников; организация и проведение научных конференций, школ и семинаров для исследователей и обучающихся по направлениям реализации Федеральной программы в возрасте до 39 лет.

Основные задачи первого этапа исследовательской программы в основном состояли в обосновании и поиске технических решений, для создания новых детекторов тепловых и холодных нейтронов для применения их на различных станциях нейтронного рассеяния и на источниках нейтронов разного типа. Для этой цели был выполнен ряд научных и научно-методических работ, которые заложили основы для непосредственного производства детекторов на следующих этапах исследовательской программы. Одно из основных направлений исследований в рамках проекта состоит в изучении эффективности использования различных конвертеров нейтронного излучения в детекторных технологиях. Одним из перспективных направлений рассматриваются тонкопленочные структуры, содержащие слои гадолиния (Gd) или кадмия (Cd). На первом этапе исследований было важно исследовать характеристики тонкопленочных структур, содержащих указанные элементы. Для этой цели был синтезирован ряд образцов и проведена их структурная характеристика методами рентгеноструктурной дифракции, рефлектометрии, магнитометрии.

Исследованиями подтверждено высокое качество создаваемых структур, которые обладают толщинами напыляемых слоев, соответствующих номинальным, низкими значениями межслойных шероховатостей. Установленное высокое качество полученных тонкопленочных структур позволяет заключить, что рассматриваемые системы могут быть использованы в качестве элементов детекторных технологий в дальнейшем. Следует отметить, что использование тонкопленочных структур в качестве конвертера нейтронного излучения пока не реализовано нигде в мире. Поэтому данная работа, выполняемая в рамках проекта, является уникальной.

За отчетный период была проведена масштабная работа по подготовке инфраструктуры для создания опытно-экспериментального участка по нанесению тонкопленочных бор содержащих покрытий. Создание детекторов с конвертером из карбида бора В4С является существенно частью всех исследований. До настоящего времени в России нет массового производства детекторов с борным конвертером, поэтому развитие соответствующей инфраструктуры является особенно важным. В рамках этой части исследований проведена значительная научно-методическая работа, которая состояла из следующих разделов:

1. Исследовано влияние режимов вакуумного магнетронного распыления на характеристики пленки карбида бора В4С, осаждаемой на металлические подложки (алюминиевые листы, пластины из нержавеющей стали, алюминиевая и медная фольга).

По результатам исследования определены оптимальные толщины слоя карбида бора, которые с одной стороны сохраняют качество покрытия, с другой стороны обеспечивают максимальную степень конверсии нейтронного излучения.

2. Разработана конструкция магнетрона, имеющего высокий коэффициент использования материала мишени – карбида бора В4С.

Полученный результат важен с точки зрения экономической эффективности использования данной технологии для массового производства детекторов нейтронов. Мишень для магнетрона, обогащенная изотопом ^{10}B , является довольно дорогим продуктом, в связи с чем условия для его максимально эффективного использования представляются чрезвычайно важными.

3. Проведены тестовые напыления карбида бора В4С на полимерные пленки из лавсана (Mylar) и полиимида (Kapton).

Использование полимерных основ для конвертера нейтронов из карбида бора В4С в детекторах нейтронов является нетривиальной технологической задачей, поскольку добиться устойчивого покрытия не удавалось пока никому. Успешные результаты, полученные в этой части исследовательского проекта, являются прорывными и позволят создавать детекторы с уникальными характеристиками.

4. Для дальнейшего развития техники напыления карбида бора В4С на полимерные основы начата реконструкция действующей вакуумной напылительной установки VSR300 под

магнетронное нанесение на рулонные материалы. На первом этапе разработана конструкторская документация.

5. Начата реализация планов по созданию и внедрению детекторов тепловых нейтронов с конвертером из карбида бора В4С на станциях нейтронного рассеяния, на различных источниках в России и за рубежом. Разработаны конструкторские документации на производство детектора с конвертером из карбида бора В4С на алюминиевой подложке и позиционно-чувствительным мониторным детектором медленных нейтронов с конвертером из карбида бора В4С.

6. В части развития детекторных технологий для регистрации тепловых нейтронов, основанных на использовании газа ^3He в качестве конвертера, была разработана конструкторская документация для создания позиционно-чувствительного детектора с резистивной нитью. Данная технология уже используется в мировых нейтронных центрах и зарекомендовала себя как надежная и эффективная. В рамках исследовательского проекта ставится задача достичь лучших показателей для пространственного разрешения вдоль анодной нити на уровне 1-1.5 мм.

7. Проведены теоретические и экспериментальные исследования по определению оптимальной конструкции регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером. Рассмотрены твердотельные тонкопленочные детекторы тепловых и холодных нейтронов на основе изотопа ^{10}B и детекторы с высоким временным разрешением с тонкопленочным изотопом ^{10}B для резонансной нейтронной эхо-спектрометрии. Выполненный анализ показывает, что целесообразно для внедрения в на экспериментальные станции по нейтронному рассеянию следующие технические решения: 1) Строу-трубки, работающие на продув, причем малого диаметра, например, 2 мм, с $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на катоде, т.к. относительно легко изготавливаются намоткой на стержень длиной 1 метр и более. 2) Проволочные пропорциональные камеры (MWPC). 3) Перспективными являются микроструктурные детекторы GEM и MicroMegas (MM), они превосходят строу-трубки и MWPC по многим характеристикам, прежде всего – по быстродействию и временному разрешению.

8. В части развития сцинтилляционных детекторов тепловых и холодных нейтронов разработан прототип одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $\text{ZnS}/6\text{LiF}$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей. Разработана программа и методики испытаний прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $\text{ZnS}/6\text{LiF}$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей. Проведены испытания прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $\text{ZnS}/6\text{LiF}$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей. Успешная реализация всех поставленных в промежуточный отчетный период задач демонстрирует высокий исполнительский уровень участников проекта.

9. В рамках исследовательского проекта создается уникальный сцинтилляционный детектор СФЕРА для нового дифрактометра, создаваемого на импульсном источнике "РАДЭКС" на

базе линейного ускорителя ИЯИ РАН. Методом Монте-Карло моделирования определены оптимальные параметры детектора и его основных узлов. Разработана конструкторская документация для создания детектора и изготовлены некоторые его узлы. Проект сцинтилляционного детектора для нейтронного дифрактометра реализуется впервые.

9. Проведена научно-техническая работа по изучению возможности увеличения эффективности регистрации нейтронов нейтронными детекторами на основе сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя. Создано 5 тестовых образцов, которые будут протестированы на пучке нейтронов в течение следующих этапов реализации исследовательского проекта.

Значительное место в отчетном периоде заняли работы в области образования и подготовки кадров. В Московском физико-техническом институте совместно с Объединенным институтом ядерных исследований создана научно-образовательная лаборатория перспективных технологий для установок и экспериментов мегасайенс. В задачи лаборатории будет входит:

- проведение фундаментальных и прикладных научных исследований мирового уровня в области физики, техники и технологий для установок и экспериментов мегасайенс, а также в смежных областях;

- интеграция лаборатории в национальные и международные коллаборации с целью усиления экспертизы в области деятельности лаборатории;

- концентрация на базе лаборатории ведущих ученых и их участие в образовательном процессе МФТИ, включая руководство научно-исследовательской работой студентов, аспирантов, молодых исследователей. Проведено ресурсное и инфраструктурное обеспечение в отчетном периоде научно-образовательной лаборатории для реализации выполнения научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории.

В 2022 году будет произведен набор обучающихся из числа студентов и аспирантов физтех-школы физики и исследований им. Ландау МФТИ для участия в научно-исследовательских практиках и выполнении научно-исследовательских работ. С этой целью за отчетный период сформирован и утвержден перечень научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов

В процессе выполнения проекта за отчетный период разработано три программы дополнительного профессионального образования, нацеленных на формирование новых компетенций у специалистов естественнонаучного, биомедицинского и археологического профиля. Разработаны учебные планы и календарные учебные графики программ дополнительного профессионального образования, фонд оценочных средств и система оценки знаний, методические текстовые и видеоматериалы. Основные преимущества разработанных программ – это возможность охвата широкого круга профессий для подготовки специалистов в области работы с синхротронным

и нейтронным излучением, а также при необходимости возможность применения дистанционных образовательных технологий для части аудиторных занятий.

Реализована образовательная программа для подготовки специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня:

Модуль 1 «Нейтронные детекторы»

Модуль 2 «Прикладная нейтронная физика»

Модуль 3 «Проектирование интеллектуальных систем»

Модуль 4 «Электроника и автоматика физических установок»

По итогам обучения слушатели, успешно выполнившие все требования образовательной программы и прошедшие итоговую аттестацию (ведомость итоговой аттестации в ПРИЛОЖЕНИИ Н) отчислены приказом от 01.12.2021 №4061к с последующей выдачей удостоверений о повышении квалификации установленного образца.

Проведена Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» проведена 2-3 декабря 2021 года в университете «Дубна». В работе конференции приняли участие 70 молодых ученых университета «Дубна», ОИЯИ, высших учебных заведений Российской Федерации и ближнего зарубежья. Программа конференции включала 31 доклад по тематике исследований.

1.1 Мероприятия по проведению синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач

1.1.1. Исследование влияния режимов технологического процесса вакуумного магнетронного распыления на характеристики плёнки карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, осаждаемой на металлические подложки (алюминиевые листы, пластины из нержавеющей стали, алюминиевая и медная фольга).

Перспективным направлением развития нейтронных детекторов является использование тонкоплёночных конвертеров нейтронов на основе карбида бора B_4C , обогащённого изотопом ^{10}B , нанесённых на алюминиевую подложку. В ходе конвертации нейтронного излучения в заряженные частицы лишь часть из них выходит из конвертера и может быть зарегистрирована, а другая пропадает в материале конвертера и в подложке. Уменьшение толщины плёнки конвертера увеличивает часть регистрируемых частиц, но уменьшает их общее количество, т.е. уменьшает эффективность. Оптимальная толщина слоя конвертера определяется величинами пробега частиц в конвертере B_4C , и как показано в работах [1.1.1.1, 1.1.1.2], не должна превышать 3 мкм. Для повышения эффективности детектора применяется многослойная конструкция, содержащая несколько слоев конвертера, либо расположение многослойной конструкции под малым (скользящим) углом к падающему пучку нейтронов. Разработаны и используются различные типы детекторов, использующих тонкоплёночные конвертеры B_4C [1.1.1.3–1.1.1.6]. На строящемся нейтронном источнике ESS (European Spallation Source, ESS), г. Лунд, Швеция, детекторы на основе твердотельных борных конвертеров планируются как основной тип детекторов [1.1.1.7].

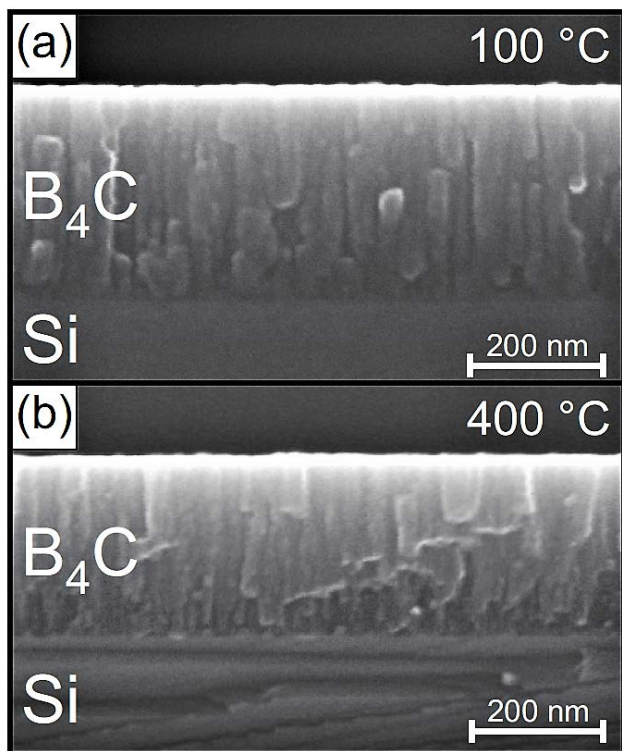


Рис. 1.1.1.1. Микрофотографии среза плёнки карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ из публикации [1.1.1.8], полученной при 100°C (a) и при 400°C (b)

нанесения карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ с использованием магнетронного распыления при нагреве подложки из алюминия толщиной от 100°C до 500°C . Данный способ позволяет получать высококачественные плёнки B_4C на алюминиевых и других металлических подложках. Уменьшение толщины подложки улучшает характеристики детектора, что особенно важно для многослойных детекторов. Нанесение плёнок B_4C на алюминиевую фольгу и на полимерные плёнки требует обеспечить формирование пленок при низких температурах нагрева камеры и подложки.

Задачей исследований является получение тонких однородных плёнок карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, обладающих высокой адгезией к подложкам большой площади из алюминиевого листа. При этом, используя магнетронное распыление, получить устойчивые плёнки при понижении температуры подложки от 200°C до 50°C , и исследовать характеристики плёнки: структуру, плотность, оптические свойства и химический состав получаемой плёнки.

Для оценки возможности нанесения плёнки карбида бора и сравнения результатов с результатами, полученными в работе [1.1.1.8], тестовое распыление природного карбида бора $^{\text{nat}}\text{B}_4\text{C}$ выполнено при температуре 400°C на модернизированной установке "МАГНЕТРОН" (г. Воткинск) Центра высоких технологий и наноструктур Института физики Дагестанского научного центра (ДНЦ РАН, г. Махачкала). Составная мишень из $^{\text{nat}}\text{B}_4\text{C}$ размером $120 \times 65 \times 3 \text{ мм}$, бондированная на медное основание, установлена в магнетрон, с разбалансировкой второго типа (разбаланс магнитного поля в стороны) с коэффициентом несбалансированности 1,2. Магнитная система

К тонкоплёночным покрытиям из карбида бора, используемым в качестве конвертера нейтронов, предъявляется ряд требований: высокая адгезия к подложке, однородность толщины, плотная структура (наименьшее количество пор), минимальное количество примесей. Нанесение плёнок с требуемыми характеристиками, особенно на легкоплавкий алюминий, усложняется особыми свойствами карбида бора – высокой температурой плавления, хрупкостью и нетерпимостью к тепловому удару.

Как пример успешного решения задачи по разработке технологии нанесения пленки можно привести совместную разработку ESS и Линчёпингского Университета, Швеция [1.1.1.8]. В работах [1.1.1.8, 1.1.1.9] приводятся результаты

магнетрона выполнена из постоянных магнитов Sm-Co. Индукция магнитного поля над поверхностью мишени составляет 700Гс, а на расстоянии 5мм – 350Гс (измерено магнитометром NOVOTEST МФ-1). Расстояние мишень подложка – 120мм. Внутри цилиндрического барабана, на котором размещены подложки установлены элементы для нагрева обратной стороны подложки до 400°С. Подложки: кремний КЭФ (40 Ом·см), используемый в качестве «свидетеля», и алюминий 0,5x100x100мм.

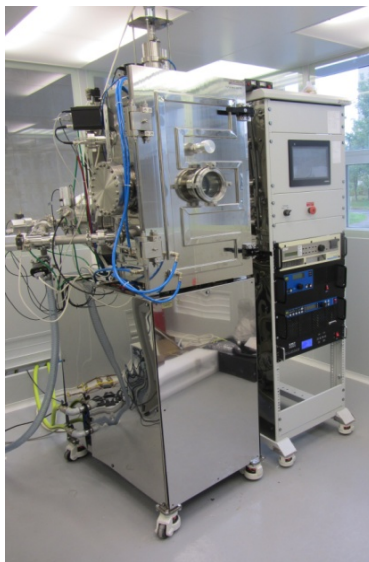


Рис. 1.1.1.2. Фото Вакуумной установки VSR-300

В основу получения тонкоплёночных покрытий из карбида бора при низких температурах заложено формирование плёнок при магнетронном распылении мишени из карбида бора с применением ионного ассистирования. Работы выполнены на вакуумной установке VSR-300 (сборка компании РОБВАК г. Фрязино), представленной на рис. 1.1.1.2.

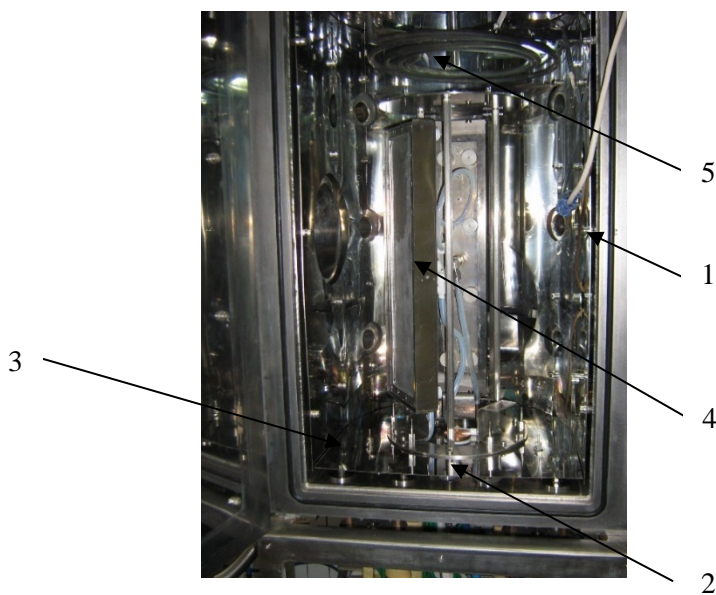


Рис. 1.1.1.3. Фотография камеры (1) VSR-300 с размещением в ней магнетрона с мишенью В₄С (на фото подставка 2 магнетрона), магнетрона с Al мишенью (3), ионного источника (4), ТЭНа (5)

Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна). На рис. 1.1.1.3 представлено фото вакуумной камеры. В центре камеры 1 установки VSR-300 U-образного типа размером

400(Ш)x700(В) мм размещены два сбалансированных магнетрона 2 и 3 с косвенным охлаждением мишени В₄С (магнетрон 2) и мишени Al (магнетрон 3), имеющих размеры 5x100x400мм, и ионный источник 4 очистки и ассистирования, размещённый между ними. Магнитная система магнетронов выполнена на основе постоянных магнитов Nd-Fe-B с установкой горизонтального шунта 3x16 мм из стали Ст3 для увеличения ширины эрозионной канавки до 10 мм. Магнитное поле над поверхностью мишени составляет около 0,1 Тл. Расстояние мишень магнетрона – подложка 80 мм. В верхней части камеры размещён ТЭН 5 для прогрева камеры и подложек до 250°С. На рис. 1.1.1.4 представлена 3D модель камеры с размещением магнетронов, ионного источника и подложек, на которые осуществляется нанесение карбида бора. Напыление плёнки осуществляется на внутреннюю поверхность цилиндрического барабана 6, где закрепляются четыре подложки 7 размером 400x280мм из алюминиевого листа толщиной 0,5 мм. В средней части барабана размещаются «свидетели», представляющие собой пластинки толщиной 0,2 мм из кремния, полированного в кристаллической плоскости <100>, служащие для контроля толщины напыляемого слоя плёнки.

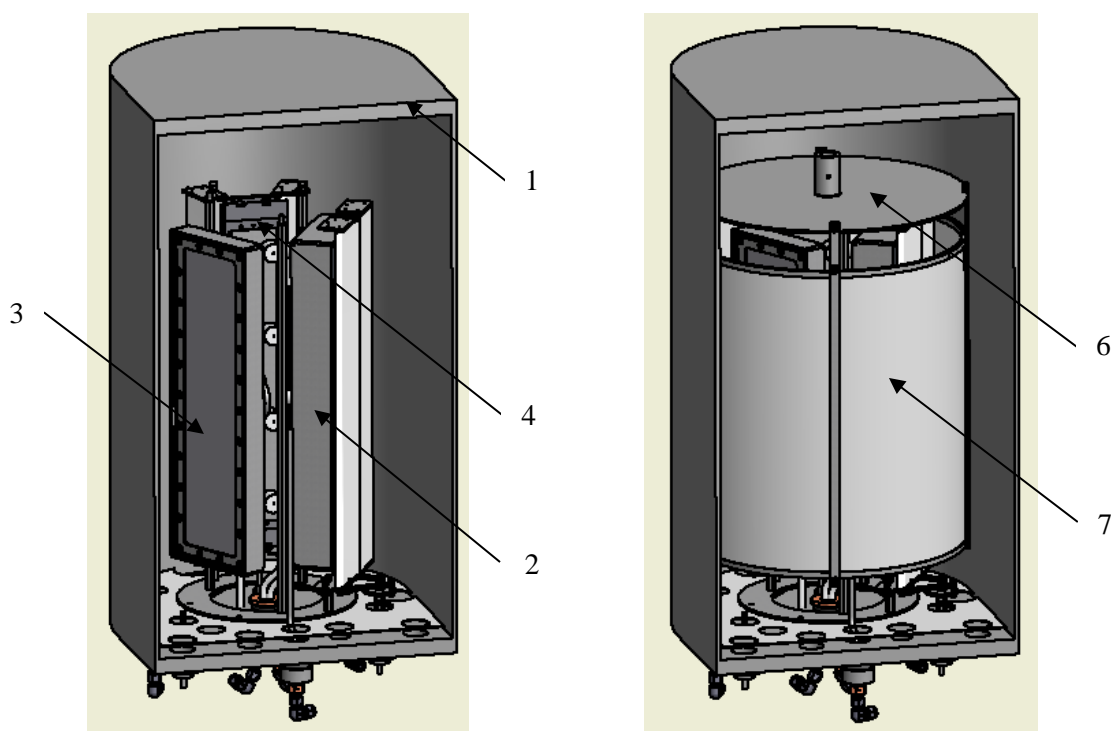


Рис. 1.1.1.4. 3D модель камеры (1) VSR-300 с размещением в ней магнетрона с мишенью В₄С (2), магнетрона с Al мишенью (3), ионного источника (4), барабана (6) с подложками (7)

Для оценки адгезии применялась плёнка с липким слоем, величина адгезии оценивалась по проценту оторванной от подложки плёнки. Для получения микрофотографий сечения плёнки

карбида бора, выполняемых с применением сканирующего электронного микроскопа, используются кремниевые пластины-«свидетели», раскалываемые по насечке, нанесённой с обратной стороны.

Магнетронное нанесение карбида бора на алюминиевые подложки протестировано на установке «Магнетрон». На подложку алюминия площадью $10 \times 100 \text{ мм}^2$, нагретую до 400°C , нанесена плёнка из природного карбида бора при двух давлениях рабочего газа аргона – $0,75$ и $3,75$ мТорр и одинаковой мощности разряда магнетрона 233 Вт ($2 \div 3 \text{ Вт/см}^2$). Ток и напряжение при этом – 370 мА , 630 В и 570 мА , 410 В соответственно. За время осаждения слоёв 360 минут получены прозрачные пленки темно коричневого цвета примерно одинаковой толщины (930 нм и 900 нм соответственно) с хорошей адгезией и однородностью толщины, причём второй светлее. Качество нанесения плёнки оценивалось с помощью «образцов-свидетелей» - небольших кремниевых пластинок, прикрепленных к алюминиевой подложке при напылении. На рис. 1.1.1.5 для обоих образцов на кремниевой подложке приведены микрофотографии плёнок скола под углом 45° , сделанные с помощью сканирующего электронного микроскопа. Если плёнка первого образца (рис. 1.1.1.5а) имеет однородную структуру и минимальный рельеф поверхности, то плёнка второго

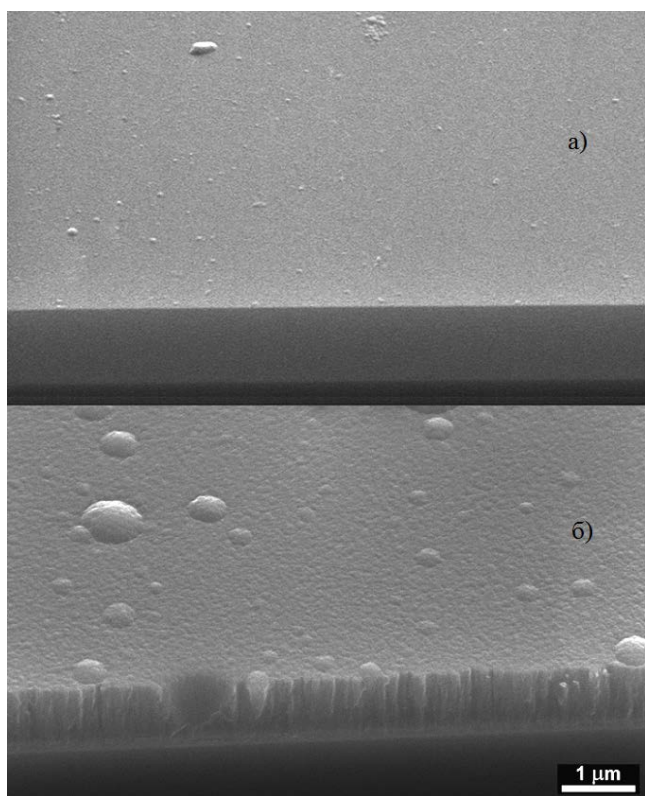


Рис. 1.1.1.5. Микрофотографии скола кремниевой подложки с плёнкой $^{nat}\text{B}_4\text{C}$ под углом 45° , полученной при 400°C и разным давлением: $0,75 \text{ мТорр}$ (а) и

образца (рис. 1.1.1.5б) имеет ярко выраженную столбчатую структуру, вероятно обусловленную кластеризацией потока распыляемого карбида бора из газовой фазы, вследствие чего формируется столбчатая структура с заметными порами, зарождаемая островками при осаждении кластерных потоков, растущими в виде столбцов, которые заканчиваются на поверхности выпуклыми неоднородностями.

Исследование нанесения карбида бора при более низких температурах выполнено на установке VSR-300. Для улучшения адгезии поверхность подложки была активирована пучком ионов рабочего газа, а на подложку нанесён подслои алюминия.

Микрофотографии скола образца №1 под углом 45° и 90° к плоскости поверхности кремниевой пластинки с плёнкой приведены на рис. 1.1.1.6. Плёнка получена за время осаждения слоя алюминия, составляющей 7 минут и последующего осаждения слоя B_4C в течение 5 часов при температуре подложки 200°C , давлении аргона $1,4 \text{ мТорр}$, и мощности магнетронов Al-магнетрона

и В₄С-магнетрона 2 кВт и 1,7 кВт соответственно, получена плёнка темно-коричневого цвета с хорошей адгезией, имеющая слой Al 380 нм и слой В₄С 1030 нм.

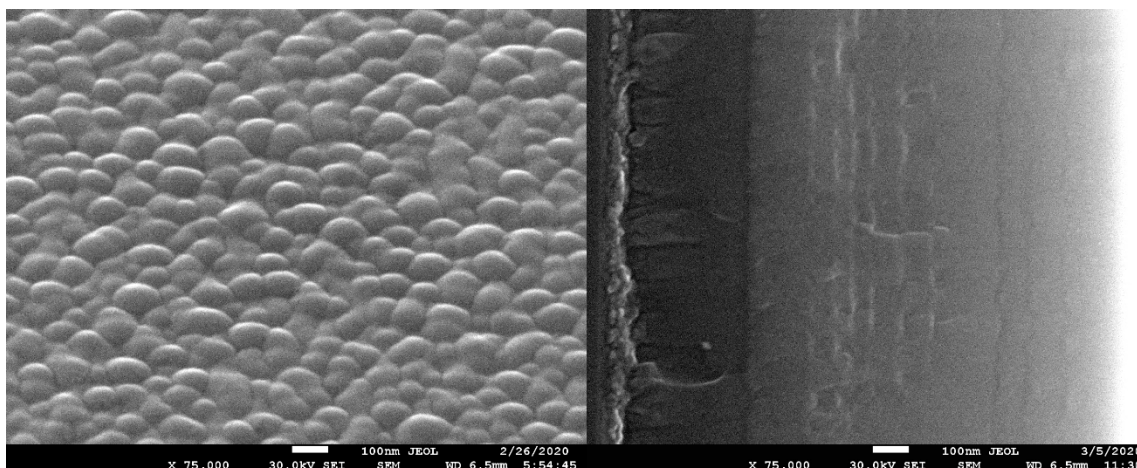


Рис. 1.1.1.6. Микрофотографии плёнки образца №1, осаждённой при 200°C, давлении Ar 1,4 мТорр.

Фото слева – поверхность под углом 45°.

Фото справа – под углом 90°: слева направо – активированный слой, слой Al (380 нм), слой В₄С (1030 нм)

На фото справа явно видна столбчатая структура с границей между слоями алюминия и карбида бора. Слоистая структура нанесения карбида бора объясняется нестабильностью работы магнетрона, которые приводили к периодическим сбоям нанесения слоя, охлаждению поверхностного слоя плёнки образованию новых центров кристаллизации, что означало рост фактически нового слоя. Тем не менее, проведённый эксперимент показывает формирование при температуре 200°C структуры аналогичной структуре, получаемой авторами публикации [1.1.1.8]. Для повышения адгезии применена активация поверхности подложки и формирование алюминиевого подслоя.

Применяя облучение осаждаемого на подложку материала плёнки потоком ионов (ионное ассистирование), удаётся не только улучшить адгезию к подложке, но и получить покрытие с другой структурой и свойствами. На рис. 1.1.1.7 представлена микрофотография плёнки образца №14, полученная при температуре подложки 200°C с применением ионного ассистирования. Видна мелкокристаллическая плотноупакованная структура слоя карбида бора. При этом слой алюминия сформировался тоже в виде мелкокристаллической, но по-другому сложенной структуры. При расколе кремниевой пластины - свидетеля проходит, по-видимому, излом слоёв плёнки по границам зёрен кристаллов, что создаёт сложный рельефный вид каждого слоя, особенно Al-слоя с более

крупными кристаллами. Толщина нанесённого слоя В₄С 450 нм. Плёнка имеет тёмно-серый цвет с зеленоватым оттенком.

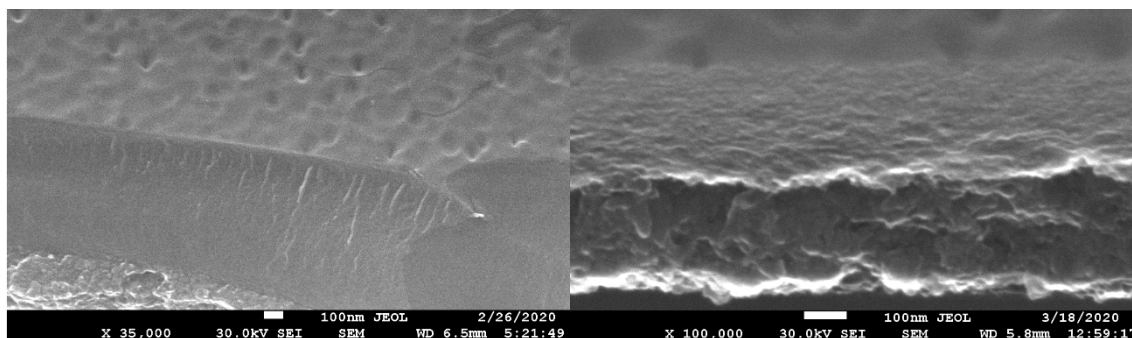


Рис. 1.1.1.7. Микрофотографии под углом 45° плёнки образца №14, осаждённой при 200°C в атмосфере Ag с ионным ассистированием, давление 1,2 мТорр. Слой Al (380 нм), слой В₄С (450 нм). Фото слева увеличение x35000. Фото справа - x100000 с другого положения, где видна структура Al-слоя.

На рис. 1.1.1.8 приведена микрофотография с увеличением x20000 плёнки образца №16, полученной при низкой температуре, около 50°C, с применением ионного ассистирования. Видно, что при понижении температуры подложки до 50°C характер структуры слоя карбида бора не изменился. При этом адгезия плёнки не ухудшилась. Однако понижение температуры повлияло на Al-слой, который сформировался в виде столбчатой структуры, т.е. на рост алюминиевого слоя поток ионов не оказывает такого же влияния, как при 200°C (см. рис. 1.1.1.7, справа).

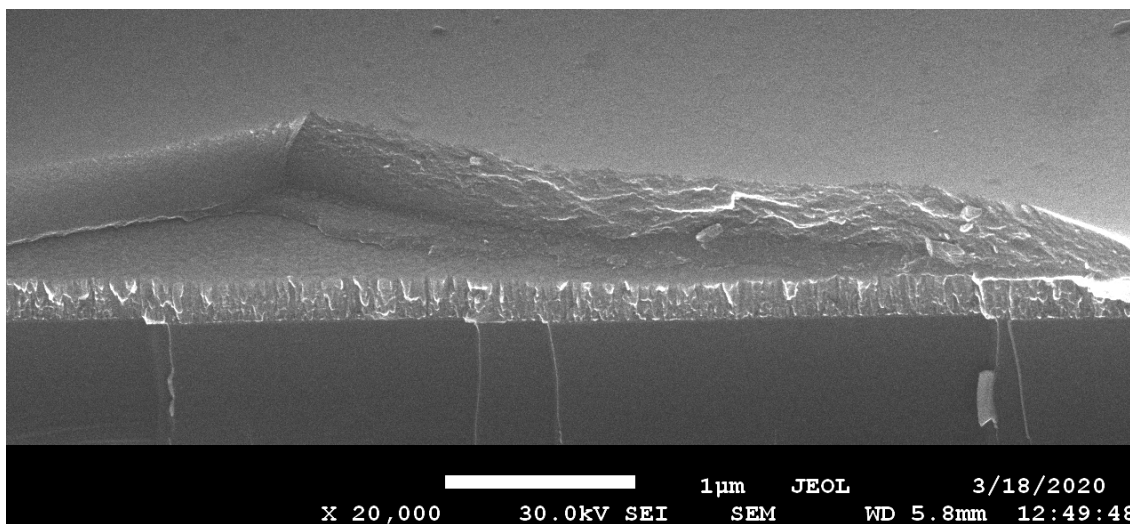


Рис. 1.1.1.8. Микрофотография под углом 45° плёнки образца №16, осаждённой в атмосфере Ag при 50°C, с применением ионного ассистирования. Давл. 1,2 мТорр.

На рис. 1.1.1.9 приведена микрофотография с увеличением $\times 75000$ плёнки этого же образца №16 в том же положении. На этой микрофотографии хорошо различима мелкокристаллическая плотноупакованная структура слоя B_4C толщиной 500 нм, структура переходного слоя ($Al + B_4C$) 70 нм и столбчатая структура Al -слоя толщиной 280 нм. Цвет плёнки тёмно-серый.

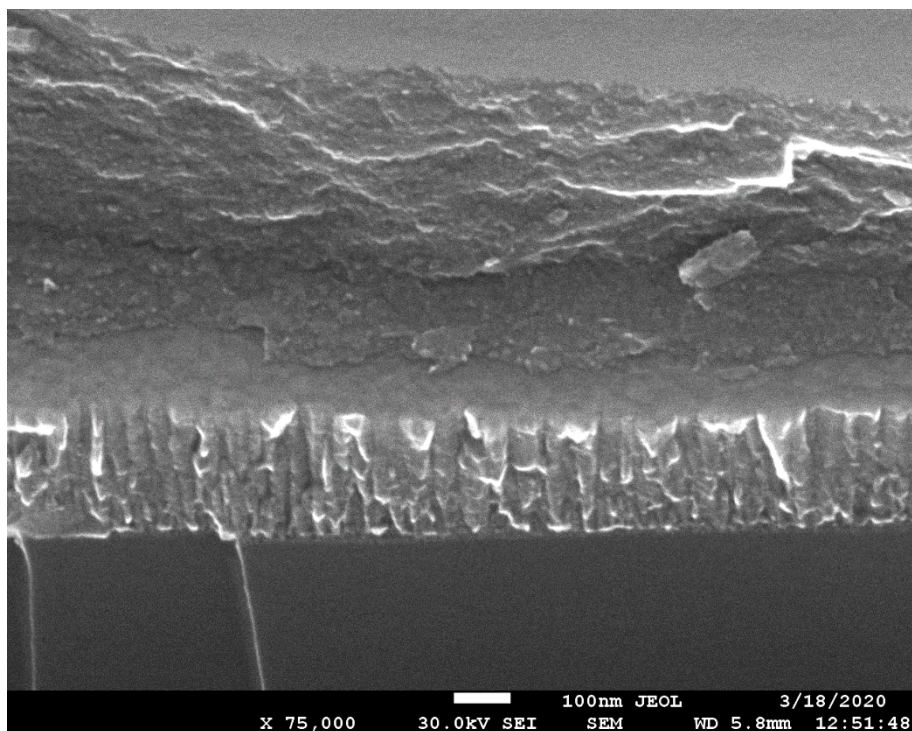


Рис. 1.1.1.9 Микрофотография под углом 45° образца №16.
Слой Al (280 нм), переходной слой ($Al + B_4C$) 70 нм, слой B_4C (500 нм).

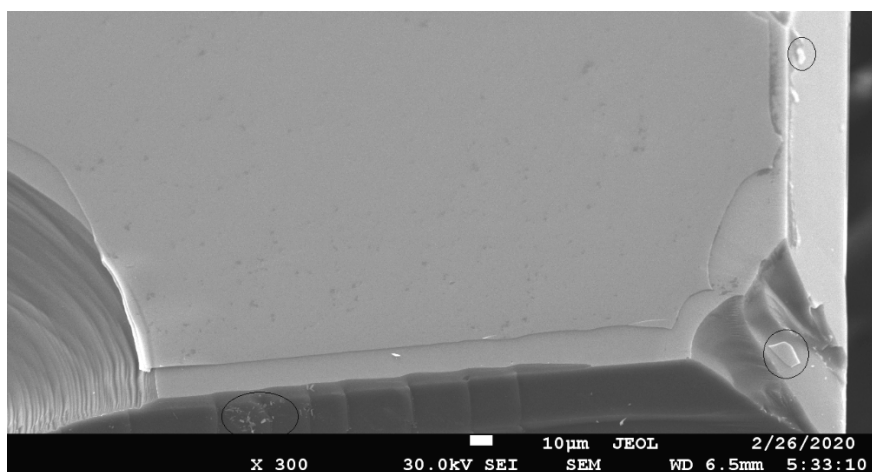


Рис. 1.1.1.10. Микрофотография образца №16. Обведены осколки слоя B_4C .

На рис. 1.1.1.10 приведена микрофотография с увеличением 300 плёнки образца №16 на кремниевой пластине, сколотой с трёх сторон и подготовленной для исследования структуры скола

плёнки. Видно, что слой W_4C скалывается не по краю скола подложки – кремниевой пластины, как это происходит с Al-слоем, что явно видно на рис. 1.1.1.8, а на некотором удалении как в одну, так и в другую сторону. Кроме того, при сколе слоя W_4C образуются куски, которые при изломе рассыпаются, по примеру слома закалённого стекла (на рис. 1.1.1.10 обведены). На рис. 1.1.1.8 слой W_4C оторван от Al-слоя. По-видимому, это связано с прочностью слоя W_4C , превышающей сцепление с Al-слоем.

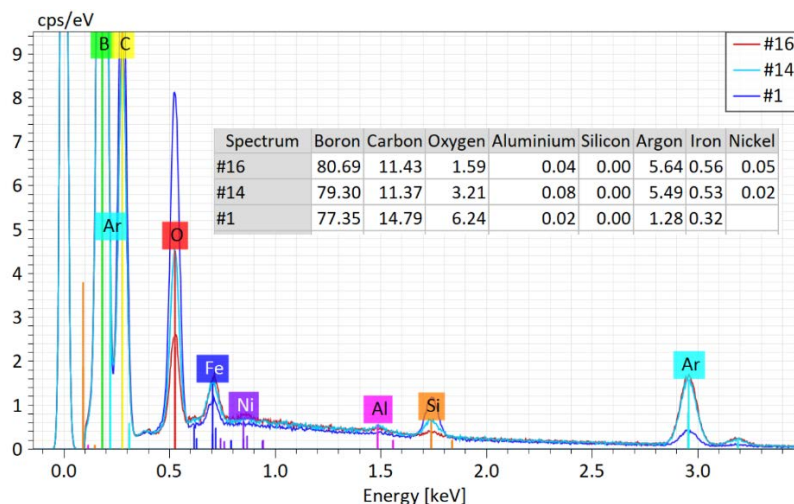


Рис. 1.1.1.11. Энергодисперсионные рентгеновские спектры плёнок W_4C , полученных без ионного ассистирования (№1) и с применением ионного ассистирования (№14, №16)

На рис. 1.1.1.11 представлены энергодисперсионные рентгеновские спектры плёнки W_4C образцов №1, №14 и №16. По сравнению с плёнкой образца №1, полученной без ионного ассистирования, в плёнках образцов №14 и №16, где применено ионное ассистирование, содержание кислорода меньше, но увеличено содержание аргона и изменено соотношение бор-углерод.

На рис. 1.1.1.12 приведён результат измерения, показателя преломления и поглощения света для плёнки образца №11, полученного при температуре подложки $200^{\circ}C$ с применением ионного ассистирования, толщиной 850 нм в диапазоне длин волн 300 нм – 1000 нм. Среднее значение показателя преломления для видимой области составляет более 2.5. Поглощение видимого света в материале также велико. При уменьшении длины волны в ультрафиолетовой области показатель преломления уменьшается при стремительном росте поглощения.

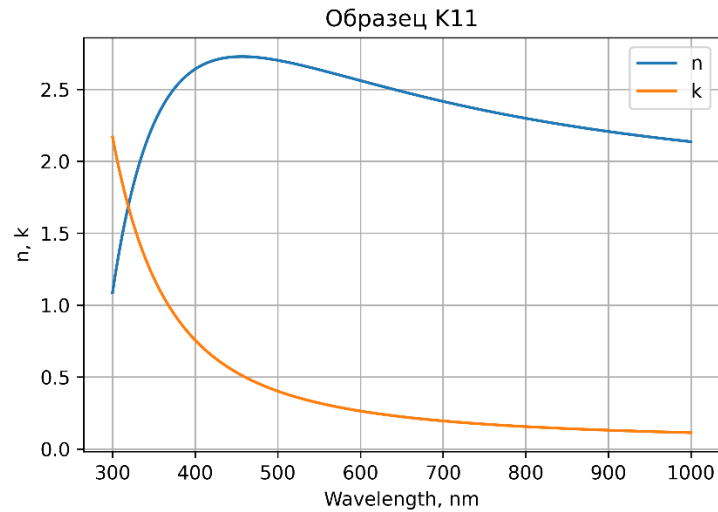


Рис. 1.1.1.11. Показатели преломления (n) и поглощения (k) плёнки В₄С, толщиной 850 нм.

Для определения оптимального режима нанесения плёнки карбида бора В₄С отобраны четыре образца с существенно разными режимами. Выбор оптимального режима основан на сравнении результатов нанесения плёнки В₄С. Отличительные особенности получения плёнок карбида бора В₄С при разных режимах нанесения сведены в таблицу 1.

Главным фактором, улучшающим качество плёночного покрытия, является применение ионного ассистирования. Применение ионного ассистирования существенно меняет структуру плёнки В₄С: столбчатая структура исчезает, и плёнка представляет собой плотную структуру, состоящую, скорее всего, из наноразмерных неориентированных кристаллов В₄С. Плёнки образцов №11, №14 и №16, полученные с применением ионного ассистирования, становятся менее прозрачными и их цвет при толщине более 500нм становится чёрным.

Таблица 1.1.1.1. Основные особенности режимов нанесения плёнки В₄С

Образец	Переход н слой	Температура подложки	Нанесение В ₄ С	Ассист	Толщина слоёв	цвет
№1	нет	200°С	В ₄ С – 300 мин	нет	Al – 380 нм В ₄ С – 1030нм	Темно-коричневый
№11	есть при 200°С	200°С	200°С В ₄ С – 180 мин	есть	Al – 270 нм (Al+В ₄ С)– 70нм В ₄ С – 850нм	Чёрный

№14	нет	200°C	200°C В ₄ С – 90 мин	есть	Al – 300 нм В ₄ С – 440нм	Тёмно-серый с зеленоваты
№16	есть при 50°C	50°C	50°C В ₄ С – 90 мин	есть	Al – 280 нм (Al+В ₄ С)– 70нм В ₄ С – 490нм	Тёмно-серый

В отличие от них плёнки, полученные без ассистирования большей толщины (1030 нм для образца №1), имеют цвет коричневого тона. Это связано с тем, что плёнки, полученные с ионным ассистированием, имеют значительно больший оптический коэффициент преломления. Поверхность плёнки В₄С образцов №11 и №14, осаждаемой при температуре 200°C, покрыта "кратерами" (рис. 1.1.1.7), что, вероятно, связано с распылением разогретой поверхности потоком ионов аргона. Это подтверждается тем, что поверхность плёнки образца №16, осаждаемой при температуре 50°C, отличается большей гладкостью и отсутствием "кратеров" (рис. 1.1.1.8, 1.1.1.9). Скорее всего, из-за недостаточной энергии атомов Al, формируется столбчатая структура Al-слоя при 50°C. По-видимому, не хватает энергии падающего излучения ионов Ag на разрушение столбчатого роста кристаллитов Al-слоя. Увеличение содержания аргона в составе плёнки образцов №14 и №16, вероятно связано с применением ионного ассистирования при осаждении слоя В₄С и "запечатывания" атомов Ag в структуре плёнки. Изменения в количественных показателях содержания бора и углерода в этих образцах скорее всего можно объяснить увеличением плотности слоя В₄С, что повышает плотность облака материала плёнки, распыляемого электронным пучком сканирующего микроскопа в режиме получения энергодисперсионных спектров. На увеличение плотности указывает так же высокий коэффициент преломления. Стремительное увеличение коэффициента поглощения, при уменьшении длины волны в ультрафиолетовой области, вероятно связано со структурой плёнки В₄С, состоящей из плотноупакованных наноразмерных кристаллов. Адгезия всех образцов, за исключением образца №1, высокая.

Таким образом, оптимальным режимом является режим получения образцов №14 и №16. Причём, если исключение нанесения переходного слоя не ухудшает адгезию, то лучшим следует считать нанесение плёнки В₄С при 50°C, но без формирования переходного слоя (Al+В₄С). Этот режим предпочтительно использовать при нанесении плёнки В₄С на алюминиевую фольгу.

Методом магнетронного распыления при ионном ассистировании получены плотные плёнки В₄С с высокой адгезией к подложкам из кремния и алюминия. Формирование плёнок В₄С при температуре 50°C даёт возможность нанесения на алюминиевую фольгу, органические материалы,

на пластмассы и полимеры, в том числе на лавсановые и полиимидные плёнки, которые можно использовать для создания детекторов нейтронов.

Получен новый тонкоплёночный функциональный материал на основе В₄С.

Для получения оптимального покрытия плёнкой В₄С следует проведение операций в следующем порядке:

1. Откачка камеры с загруженными подложками из алюминиевых пластин 0,5x280x400 мм до давления $5 \cdot 10^{-5}$ Торр.
2. Прогрев камеры при температуре 200°C в течении 3 часов.
3. Остывание камеры до установленной температуры подложки 50 – 200°C.
4. Очистка поверхности подложки потоком ионов Ag при режиме ионного источника 1,8 кВ ток 50 – 70 ма расход газа Ag 20 ст.мм/мин.
5. Нанесение Al - подслоя магнетронным распылением – давление в камере 1,2 мТорр, режим стабилизации мощности 1 кВт, время 14 минут.
6. Нанесение В₄С магнетронным распылением – давление в камере 1,2 мТорр, режим стабилизации мощности 1,7 кВт, время устанавливается в зависимости от желаемой толщины.
7. Охлаждение камеры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1.1.1.1] Stefanescu, I., et al., Nucl. Instr. Meth. A, 2013, vol. 727, p.109–125, doi:10.1016/j.nima.2013.06.003
- [1.1.1.2] Piscitelli F., et al, JNST.2013.vol.8.p.04020
- [1.1.1.3] Lacy J.L., et al, IEEE Trans. NS 2013.vol.60. N2.p.1140-1146
- [1.1.1.4] Kohli M., et al, Nucl. Instr. Meth. A, 2016, vol. 828, p.242-249
- [1.1.1.5] Anastasopoulos M., et al, JINST, 2017, 12, P04030, doi:10.1088/1748-0221/12/04/P04030
- [1.1.1.6] Piscitelli F., et al, JNST, 2017.vol.12. p03013, doi:10.1088/1748-0221/12/03/P03013
- [1.1.1.7] Kirstein O., et al., POS, 2015, vol. 227, p. 029, doi:10.22323/1.227.0029
- [1.1.1.8] Høglund C., et al., J. Appl Phys, 2012, vol. 111(10), 104908, doi:10.1063/1.4718573
- [1.1.1.9] S. Schmidt, et al., J. Mater. Sci., 2016, 51:10418–10428, doi:10.1007/s10853-016-0262-4

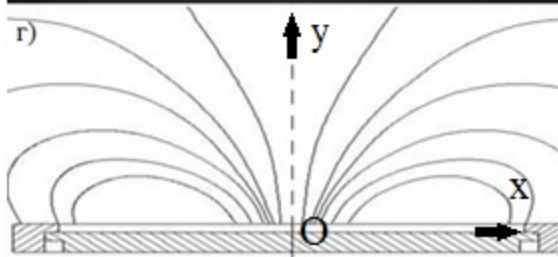
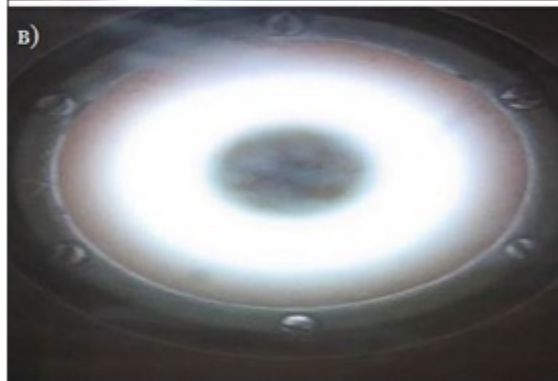
Приложения:

1. Отчёт о проведённых исследованиях по определению оптимальных режимов.
Файл Прилож.1.1.1.pdf
2. Протоколы исследований Прилож1.1.1_2.pdf

1.1.2. Разработка конструкции магнетрона, имеющего высокий коэффициент использования материала мишени – карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, с применением программного пакета Elcut и программного пакета Pretarger для моделирования магнитной системы магнетрона и прогнозирования коэффициента использования мишени.

ВВЕДЕНИЕ

При нанесении тонкоплёночных покрытий из драгоценных и дорогостоящих материалов вакуумным магнетронным распылением особо важной характеристикой магнетрона является эффективность использования материала мишени, т.е. относительная величина количества



вещества, распыляемого до утилизации мишени. Эта величина характеризуется коэффициентом K_e использования материала мишени (КИММ): $K_e = \frac{m_0 - m_e}{m_0} 100\%$, где m_0 – начальная масса мишени, ($m_0 - m_e$) – масса мишени до её утилизации. Утилизация наступает при выработке мишени-катода, достигающей минимально допустимую толщину катода в зоне максимальной выработки. Типовые значения для КИММ соответствуют $K_e = 12 - 25\%$. Вторичное применение металлических мишеней возможна для повторного использования при переплавке утилизированных мишеней, хотя на практике это редко применяется, так как утилизированная мишень после переплавки может содержать большое количество примесей. Вторичное применение керамических утилизированных мишеней, в том числе мишеней из карбида бора B_4C невозможно. Поэтому при применении в качестве мишени спечённых из дорогих порошковых смесей, содержащих изотоп бора ^{10}B керамических пластин $^{10}\text{B}_4\text{C}$ очень важно использование магнетронных распылительных систем (МРС) с максимально возможной эффективностью использования материала мишени. Это в первую очередь зависит от конструкции магнитной системы магнетрона.

Совершенствуя магнитную систему, можно достичь значений $K_e = 65 - 80\%$. Кроме этого, увеличение КИММ приводит к расширению зоны распыления от узкой

Рис. 1.1.2.1. Связь формы эрозии мишени магнетрона с свечением плазмы и конфигурацией магнитного поля

- а) фотография выработанной мишени;
- б) светящаяся плазма с торца мишени;
- в) вид под углом на светящуюся плазму;
- г) форма силовых линий магнитного поля в сечении.

эрозионной канавки, напоминающей в сечении точечный источник (для МРС с $K_e = 12\%$), до широкой зоны распыления, соответствующей в сечении протяжённому источнику (для МРС с $K_e = 80\%$). Расширение зоны распыления повышает однородность и равномерность напыляемого слоя плёнки. Практическую реализацию подбора магнитной системы при конструировании такого высокоэффективного магнетрона удобнее всего выполнять с применением компьютерного моделирования и расчёта прогнозируемого профиля эрозии мишени магнетрона.

МОДЕЛЬ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

МРС представляют собой разновидность распылительных систем на основе тлеющего газового разряда в режиме аномального разряда, содержащих магнитную систему, удерживающую электроны плазмы у катода для многократного столкновения электронов с атомами рабочего газа до максимального расхода кинетической энергии электронов на ионизацию атомов рабочего газа. Удержание электронов в замкнутой области скрещенного электрического и магнитного полей происходит за счёт силы Лоренца, заставляющей электроны двигаться параллельно поверхности катода-мишени по циклоидным замкнутым траекториям, образуя в дрейфовом приближении замкнутый ток Холла. Планарные МРС имеют туннелеобразное замкнутое магнитное поле, имеющее в сечении арочный вид (рисунок 1г), в которой лишь верхняя часть свода имеет область, где вектор магнитной индукции параллелен поверхности катода. Так как электрическое поле направлено перпендикулярно поверхности, то такая форма магнитного поля воздействует на электроны не одинаково, что приводит к неоднородности плотности ионизирующих электронов и, соответственно, к неодинаковой плотности образования ионов рабочего газа, производящих неоднородное распыление катода-мишени. Наблюдения показывают на то, что конфигурация магнитного поля, распределение яркости свечения плазмы разряда, плотность тока по поверхности катода и распыление (эрозия) катода-мишени взаимосвязаны. На рис. 1.1.2.1 [1.1.2.2] наглядно видна эта связь, представленная в табл. 1.1.2.1.

Анализ табл. 1.1.2.1 и рис. 1.1.2.1 показывает, что форма эрозии прямо связана с распределением яркости свечения плазмы и конфигурации магнитного поля, определяющего распределение компоненты V_x вектора V магнитного поля. Из анализа следуют выводы:

- 1) основные процессы ионизации рабочего газа, ответственные за распыление и эрозию катода-мишени происходят в приповерхностном слое;
- 2) максимальная яркость свечения плазмы, сосредоточена в приповерхностном слое, совпадает с наибольшей глубиной эрозии мишени;
- 3) границы области эрозии определяются границами свечения плазмы и границами величины V_x отличной от нуля;
- 4) эрозионную область можно условно разделить на область общей эрозии и эрозионную канавку;

5) форма области общей эрозии согласуется со свечением плазмы без учёта наиболее яркого свечения плазмы в виде «шнура» и проекцией распределения величины B_x ;

б) центр эрозионной канавки совпадает с максимальной яркостью «шнура» плазмы и верхней областью приповерхностных куполообразных силовых линий магнитного поля, там, где вектор индукции параллелен поверхности катода-мишени;

7) яркость свечения плазмы ослабевает так же, как ослабевает компонента B_x вектора B магнитного поля.

Таблица 1.1.2.1

Сравнение эрозии мишени со свечением плазмы и конфигурацией магнитного поля.

	эрозия мишени, рис. 1.1.2.1а	свечение плазмы с торца, рис. 1.1.2.1б	свечение плазмы под углом, рис. 1.1.2.1в	конфигурация магнитного поля, рис. 1.1.2.1г
границы области	начало на небольшом расстоянии от центра, окончание ограничено прижимным кольцом	начало совпадает с границами свечения плазмы	начало совпадает с границами свечения плазмы	начало ограничено значением $B_x \approx 0$
форма основной области эрозии	имеет плавное увеличение глубины эрозии от центра и краёв к середине мишени, вида $1/x^2$	плавное нарастание светящегося облака как по толщине, так и по яркости от центра и краёв к середине мишени	плавное нарастание светящегося облака как по толщине, так и по яркости от центра и краёв к середине мишени	увеличение составляющей B_x от центра и краёв к середине как по величине, так и по высоте столбца перпендикулярно мишени
Эрозионная канавка	максимальная глубина канавки в	максимальная яркость светящегося	максимальная яркость светящегося	максимальной высоты столбец, где

	середине мишени с плавным уменьшением к краям, вида гауссианы	«шнура» приходится на середину мишени с резким ослаблением к центру и краям	«шнура» приходится на середину мишени с резким ослаблением к центру и краям	составляющая B_x максимальна, приходится на середину мишени с резким ослаблением к центру и краям
Распределение плотности	–	максимальная плотность свечения всей плазмы у поверхности с монотонным ослаблением при удалении от мишени	свечение ослабевает к центру и краям	максимальное значение величины B_x на поверхности мишени с общим монотонным ослаблением при удалении от мишени

На основе многолетних исследований магнетронного разряда, обобщённых в работе [1.1.2.2], можно магнетронный разряд разбить на три характерные области: катодный слой, область частично замагниченной плазмы и анодный слой. На рис. 1.1.2.2 схематично показано магнитное поле, электрическое поле и характерные области плазмы. В магнетронном разряде для типичных МРС величина B индукции магнитного поля находится в пределах 0,1 – 0,001 Тл.

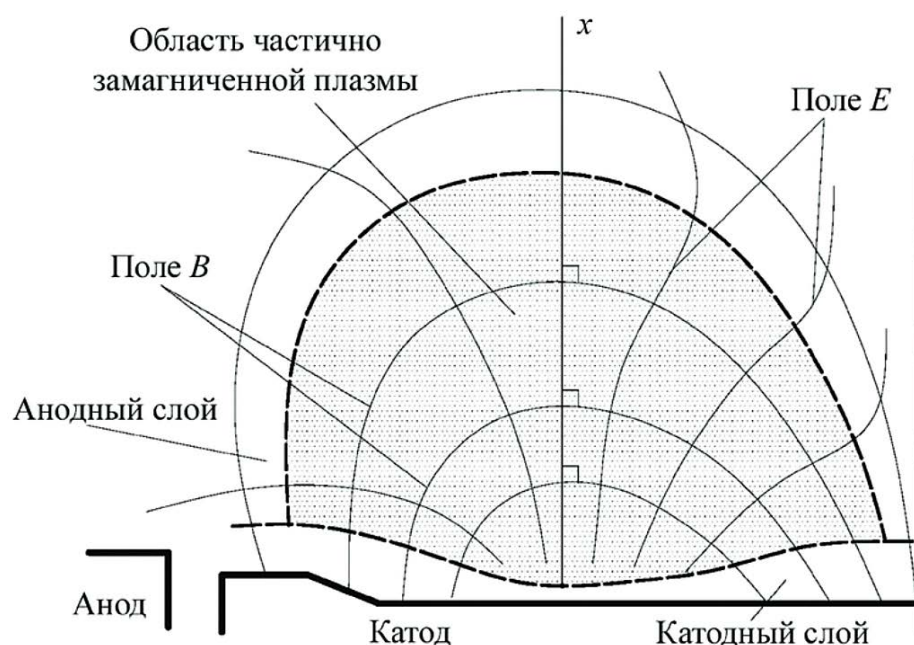


Рис. 1.1.2.2. Схема расположения характерных областей разряда в МРС.

Катодный слой начинается от поверхности катода-мишени. Толщина слоя имеет величину 0,1 – 10 мм и определяется радиусом циклоидного ускоряющегося движения электрона, который в свою очередь определяется приложенным разрядным напряжением U и величиной компоненты B_x вектора B магнитной индукции. В этом слое происходит основное падение напряжения, составляющее 80 – 90% от разрядного напряжения U . Напряженность электрического поля имеет высокое значение $8 \cdot 10^6$ В/м, резко спадающее на краю границы слоя менее $4 \cdot 10^4$ В/м. В катодном слое не происходит ионизации рабочего газа, так как имеется насыщение, определяемое током разряда и ионный ток равен току разряда: $I_i = I$, значит перенос тока разряда осуществляется ионами. Отсутствие процессов ионизации объясняет отсутствие свечения, поэтому катодный слой называют тёмным катодным пространством, ТКП. Здесь концентрация ионов имеет максимальную величину $n_i = n_{max}$, определяемую условием устойчивости магнетронного разряда: $\alpha \cdot \beta = 1$, где $\alpha = 0,001 \div 0,1$ – коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии, зависящий от состава рабочего газа и материала мишени, β – коэффициент электронной ионизации рабочего газа (в связи с малостью величины автоэлектронной и термоэлектронной эмиссией можно пренебречь). Вторичные электроны не составляют ток разряда, а лишь обеспечивают устойчивость разряда. Так как концентрация вторичных электронов определяется выражением $n_e = \alpha \cdot n_i$, то присутствующий в ТКП электронный ток вторичной электронной эмиссии меньше ионного тока и определяется: $I_e = \alpha \cdot I_i$. Необходимо понимать, что в этой области наряду с электронно-ионным равновесием рабочего газа присутствуют выбитые из мишени-катода атомы, молекулы и кластерные образования материала катода, которые подвергаются перезарядке – ионизации на оба заряда и рекомбинации, а молекулы могут разваливаться на атомы и ионизоваться, собираться в более устойчивые соединения с реакционным газом, молекулы которого разваливаются, ионизируются и вступают в молекулярные связи с материалом мишени. Именно в тонком катодном слое происходят реактивные процессы, а ионы рабочего газа приобретают основную энергию, необходимую для распыления мишени посредством её бомбардировки. Магнетронное распыление очень энергоёмко и составляет около 500 эВ на один атом мишени. Так, на выбивание атомов из мишени всего расходуется энергия 15 – 40 эВ, состоящая из пороговой энергии распыления (энергии связи), составляющей 15 – 30 эВ, и энергии распылённых атомов, лежащей в пределах 1 – 10 эВ. Остальная энергия идет на нагрев мишени. Напряжение магнетронного разряда находится в пределах 250 – 800 В. При увеличении напряжения увеличивается энергия бомбардирующих ионов и возрастает коэффициент распыления, но при этом усиливается также процесс имплантации (внедрения) ионов в кристаллическую решётку мишени, приводящий к её деформации, объёмному искажению и, как следствие, нагреву мишени, требуя эффективное охлаждение.

Область частично замагниченной плазмы примыкает к катодному слою и начинается там, где заканчивается ион-электронное равновесие рабочего газа и вышедшие из мишени электроны закончили набор энергии и начинают расходовать её на ионизацию. Наличие ионизации объясняет свечение этой области. По мере удаления от мишени количество электронов, способных к ионизации уменьшается, уменьшая количество актов ионизации, чем объясняется ослабление свечения плазмы. Начиная от границы с катодным слоем число столкновений настолько частое, что выполняется соотношение $\omega_e \cdot \tau_e \gg 1$; $\omega_i \cdot \tau_i < 1$, где ω_e , ω_i – циклотронные частоты для электронов и ионов; τ_e , τ_i – время между столкновениями для электронов и ионов. Если это условие выполняется, то эквипотенциали электрического поля совпадают с силовыми линиями магнитного поля и справедливо соотношение: $\vec{E} \times \vec{B} = 0$ [3, 4], означающее, что силовые линии электрического поля становятся перпендикулярными силовым линиям магнитного поля. Таким образом, магнитное поле оказывает определяющее влияние на движение электронов, а на ионы ($\omega_i \cdot \tau_i < 1$) нет, они движутся беспрепятственно к катоду вдоль сформированных силовых линий электрического поля. Поэтому эту область разряда и называют частично замагниченной. По мере удаления от мишени, магнитное поле спадает, и указанные условия, постепенно ослабляясь, пропадают. Этим определяются границы распространения области частично замагниченной плазмы, характерные до ослабления поля до 0,001 Тл, где $\omega_e \cdot \tau_e \sim 30 \dots 90$. Эксперименты показывают, что переходная зона начинается там, где величина индукции спадает до величины около 0,02 Тл. Толщина этой области составляет от 10 до 100 мм, а падение напряжения – 10 ... 15% от напряжения U магнетронного разряда. Напряжённость электрического поля по мере удаления от мишени изменяется от $2 \cdot 10^4$ В/м в пограничном слое, сначала спадая быстро, затем всё более плавно и приближается до значений, близких к нулю. Особенностью этой области является существование двух встречно направленных потоков заряженных частиц: ионного, представляющего ионы, образованные ионизацией рабочего газа электронным ударом, и электронного, состоящего из электронов, выбитых из атомов газа при ионизации, которые вместе с ионами составляют разрядный ток, и высокоэнергичных вторичных электронов, энергия которых ослабевает по мере удаления от катода-мишени. Поэтому в отличие от образующихся ионов газа, свободно начинающих ускоренное движение вдоль силовых линий электрического поля в направлении катода, электроны удерживаются воздействием магнитного поля, заставляющего их двигаться по циклоидным траекториям вдоль поверхности мишени. Движение в сторону анода происходит лишь при столкновении с атомами газа, которое приводит к перескоку электрона на более удалённые от мишени траектории. Если энергия электрона достаточна для ионизации, то происходит перескок и ионизация атома, если энергия электрона недостаточна для ионизации, то перескок происходит в результате упругого столкновения. Поэтому на границе с анодным слоем ток плазмы в основном состоит из электронов, а на границе с катодным слоем – из ионов.

Анодный слой непосредственно примыкает к аноду и служит для транспортировки электронов к аноду. Падение напряжения на анодном слое мало и составляет величину порядка одного-двух потенциалов ионизации рабочего газа, для аргона около 15...30 В. Разрядный ток в анодном слое осуществляется электронами.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОФИЛЯ ВЫРАБОТКИ МИШЕНИ

Для математического описания формы эрозии мишени систему координат располагаем в плоскости арочного магнитного поля (рис. 1.1.2.1г) и связываем начало O координат с центром мишени магнетрона так, что ось Ox направлена вдоль поверхности мишени, а ось Oy – перпендикулярно поверхности. Вторичные электроны, вылетающие перпендикулярно плоскости мишени, под воздействием электрического поля двигаются с ускорением параллельно оси Oy , воздействие магнитного поля отклоняет электроны перпендикулярно плоскости xOy по циклоиде, радиус которой определяется выражением: $r = \frac{m}{e} \frac{E}{B_x^2}$, где $m=9,1*10^{-31}$ кг, $e=1,6*10^{-9}$ Кулон. Считая, что высота d ТКП равна r , выполняем её вычисление, исходя из величины компоненты B_x индукции и величины напряжённости электрического поля, которая определяется из соотношения $E = \frac{U}{d}$. В рассматриваемом сечении ускоренные электроны входят в область частично замагниченной плазмы параллельно оси Oy . Благодаря очень частым ионизирующим столкновениям электронов электрическое поле изменяет свою конфигурацию и становится перпендикулярным силовым линиям магнитного поля. Происходит разделение электронов: часть движется перпендикулярно магнитным силовым линиям, часть вдоль силовых линий. Количество первых, удерживаемых воздействием на них магнитного поля, приводящего к вращению по окружности, зависит от угла между вектором скорости электронов и вектором магнитной индукции, который определяется отношением B_x/B . Эти электроны вызывают ионизацию области частично замагниченной плазмы и формируют поле эрозии, форма которого зависит от количества захваченных электронов над точкой области катода. Распределение относительной глубины h_e эрозии определяется:

$$h_e(x) \sim \int_{y=d(x)}^{y_{max}} n(x,y) \frac{B_x(x,y)}{B(x,y)} dy, \quad (1.1.2.1)$$

где $d(x)$ – высота ТКП, $n(x,y)$ – концентрация актов ионизации. Другая часть электронов вдоль силовых линий устремляется к верхней точке свода куполообразного поля, где вектор индукции параллелен поверхности мишени. Вследствие этого, в верхней области свода концентрируется большое количество электронов, плотность распределения которых подчиняется распределению Гаусса. Ионизация этими электронами ответственна за эрозию области канавки, ширина которой связана с плотностью тока магнетронного разряда, а глубина – количеством захваченных электронов над эрозионной канавкой в данной точке. Распределение относительной глубины h_g в профиле канавки определяется:

$$h_g(x) \sim \int_{y=d(x)}^{y_{max}} n(x,y) \exp\left(-\frac{\left(\frac{B_x(x,y)}{B(x,y)}-1\right)^2}{2\sigma^2}\right) dy, \quad (1.1.2.2)$$

где $\sigma = \frac{1-B_x/B}{2}$ – дисперсия распределения, задаваемая в зависимости от плотности магнетронного разряда, и характеризуемая допустимым углом отклонения вектора \vec{B} индукции от поверхности катода. Распределение концентрации актов ионизации пропорционально изменению индукции, точнее её компоненты B_x , удерживающей электроны:

$$n(x,y) \sim \frac{B_x(x,y)}{B_{x0}(x,y)}, \quad (1.1.2.3)$$

Итоговый профиль эрозии определяется нормированной суммой нормированного профиля эрозийной канавки и нормированного профиля зоны эрозии, умноженной на подбираемый коэффициент k , который изменяется в пределах от 0,1 до 0,8 и показывает долю удержанных электронов от их общего числа, зависящего от плотности тока магнетронного разряда (электрической мощности подаваемой на магнетрон):

$$h(x) = h_g(x) + k \cdot h_e(x) \quad (1.1.2.4)$$

ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ PRETARGER

Программная реализация описанной модели расчёта прогнозируемого профиля эрозии мишени магнетрона названа программой Pretarger (Prediction of target erosion). Входными данными программы являются данные в виде текстовых таблиц распределения индукции магнитного поля $B(x,y)$ и её компонентов $B_x(x,y)$ и $B_y(x,y)$ над поверхностью мишени. Функциональные возможности программы включают расчет профилей выработки материала мишени магнетронных распылительных систем планарного типа любых размеров и конструкций. Программа Pretarger преобразует входные таблицы в матрицы данных, выполняет вычисление по приведённым выше формулам и выводит график профиля $h(x)$ прогнозируемой эрозии мишени. Входные данные в виде таблиц могут быть составлены либо прямыми измерениями распределения магнитного поля с помощью магнетометра, либо с помощью программы магнитостатического моделирования и расчёта физических полей по модели конструкции магнетрона и его магнитной системы. В качестве программы расчёта магнитного поля по модели магнитной системы магнетрона выбран программный комплекс ELCUT [1.1.2.5], основанный на моделировании физических полей методом конечных элементов. При этом объекты ELCUT обеспечивают постановку задачи, описание ее геометрической модели, построение сетки конечных элементов и ее решение. Использование ELCUT особенно целесообразно на этапе проектирования новых магнетронов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ МАГНЕТРОНА

Магнитная система стандартного сбалансированного магнетрона в поперечном сечении представляет собой центральный магнит и два периферийных обратной полярности, размещённые на общем магнитопроводе так, что силовые линии магнитного поля образуют куполообразную форму. Для разработки магнетронов с большим коэффициентом использования мишени следует строить магнитную систему исходя из следующего принципа. Магнитную систему надо построить так, чтобы силовые линии вблизи мишени выглядели как два «купола». При этом посередине между ними силовые линии опускаются, и индукция в этом месте на поверхности мишени должна быть близка к нулю, или меньше нуля на небольшую величину. При удалении от поверхности мишени два малых «купола», образуемые силовыми линиями, сдвигаются к середине, а поле в средней части становится положительным. При удалении от поверхности мишени силовые линии сначала приобретают седловидный вид, затем выпрямляются и, при большем удалении, происходит их превращение в единый купол. При построении магнитной системы такого вида необходимо, чтобы индукция под центром малых куполов у поверхности мишени была максимальной, порядка 0,12 – 0,15 Тл. При таких величинах у поверхности мишени, необходимо, чтобы над мишенью в области, где силовые линии выпрямляются и переходят в единую куполообразную форму, величина индукции не превышала 0,04 Тл. В этом случае вблизи мишени плазма горит в области малых куполов, образуя два шнура, формирующие две глубокие эрозионные канавки. Между ними появляется третий плазменный шнур в центре «седла» при достижении там индукции более 0,02 Тл, начинающий формирование центральной эрозионной канавки. Так как происходит плавный переход от двухкупольного вида силовых линий в однокупольный, то границы между канавками размываются. Подбирая соотношение величин индукции, можно получить форму общей эрозии мишени близкую к П-образной форме, тем самым увеличив КИММ до величин более $K_e = 60\%$.

Конструктивное решение №1

На рис. 1.1.2.3 показана цветовая диаграмма компоненты индукции магнитного поля B_x модели магнитной системы, рассчитанной программой ELCUT. Модель магнитной системы рассчитана на работу магнетрона с мишенью шириной 100 мм, поверхность которой отстоит от поверхности магнитов на 10 мм. В модели заложено использование магнитов неодим-железо-бор марки N45 – N48. Высота магнитов 20 мм. Толщина общего магнитопровода-основания из стали Ст3 – 5 мм, ширина 106 мм. На расстоянии 15 мм размещён магнитный экран из стали Ст3, толщиной точно 2 мм и высотой 20 мм, скошенный под углом 30 градусов к магнитной системе.

Магнитная система состоит (слева направо от центра):

1. Пластина из Ст3 толщиной 1 мм, предназначенная для прижима центральных встречно направленных магнитов друг к другу за счёт магнитных сил;
2. Центральный магнит шириной 15 мм, направление намагниченности которого вдоль горизонта и направлена к центру, примагничен к стальной пластине;

3. Дополнительный к центральному магнит шириной 3,5 мм, имеющий вертикальное направление намагниченности сверху вниз, плотно прижат к центральному магниту (примагничен);
4. Периферийный магнит шириной 11 мм (дистанционный зазор 15,5 мм), имеющий горизонтальное направление намагниченности, направленное к центру;
5. Дополнительный к периферийному магнит шириной 7,5 мм, имеющий направление намагниченности сверху вниз, плотно прижат к периферийному магниту (примагничен).

Формула магнитной системы (симметричная, поэтому приводим правую половину):

0 ÷ 0,5 (СтЗ) ÷ 15,5 (←15) ÷ 19 (↓3,5) ÷ 34,5 (зазор 15,5) ÷ 45,5 (←11) ÷ 53 (↓7,5) ÷ 68 (зазор 15) ÷ 70 (2мм СтЗ)

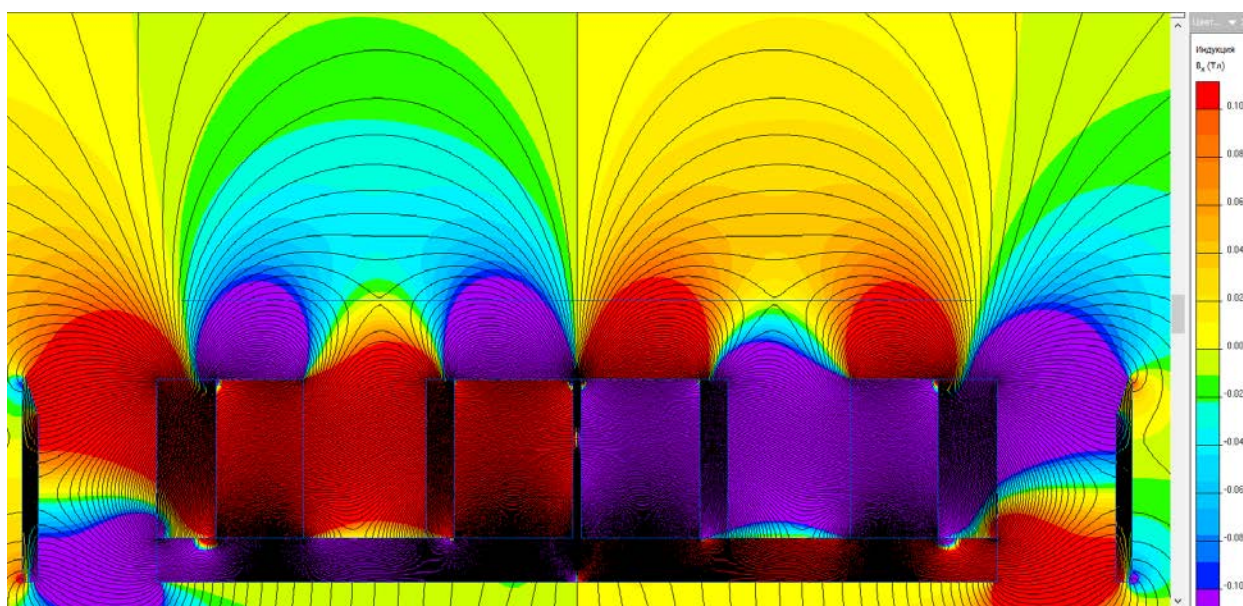


Рис. 1.1.2.3. Цветовая карта компоненты индукции магнитного поля B_x магнитной системы №1

На рис. 1.1.2.3 представлены силовые линии магнитного поля и цветовая диаграмма компоненты индукции магнитного поля B_x , направленной вдоль поверхности мишени. Величина B_x характеризует интенсивность ионизации плазмы и формирование эрозии мишени. На графике, представленном на рис. 1.1.2.4 представлено распределение индукции B магнитного поля и его компонент B_x и B_y на уровне поверхности мишени от центра мишени до 70 мм от центра. Из графика видно, что на расстоянии 25 мм от центра мишени индукция B магнитного поля равна нулю. Центр «купола» определяется в точках обнуления величины компоненты B_y . В этих точках величина компоненты B_x достигает максимального значения. Это – 12,2 мм, 25 мм и 39,2 мм. Величина индукции B_x составляет около 0,14 Тл для первого «купола», второй «купол» не образуется в связи с малостью величины индукции, B_x третьего «купола» около 0,125 Тл. На рис. 5 приведён график

распределения индукции B и его компонент B_x и B_y на уровне 5 мм от мишени. Здесь уже образуются три «купола». Центры «куполов» приходятся на 16 мм, 25 мм и 35 мм. Величины индукции B_x составляют 0,06 Тл, 0,03 Тл и 0,06 Тл соответственно. В этом случае «горят» три плазменных шнура с центрами в указанных точках. Интенсивность центрального шнура в 2 раза слабее боковых плазменных шнуров и более, чем в 4 раза слабее рассмотренных ранее двух приповерхностных плазменных шнуров. На рис. 1.1.2.6 приведён график распределения индукции B и его компонент B_x и B_y на уровне 10 мм от мишени. Здесь наблюдается исчезновение боковых «куполов» и образование единого «купола» с центром на 26 мм. Величина индукции B_x здесь составляет чуть более 0,35 Тл. Рассматривая кривую B_x на всех трёх графиках, можно заметить внешнюю границу распространения канавки эрозии. Она определяется чуть больше места перегиба максимального значения. По первому графику это от 8 – 9 мм до 41 – 42 мм. По второму (5 мм от мишени) от 9 – 10 мм до 40 – 41 мм. По третьему (10 мм от мишени) от 11 -12 мм до 39 – 40 мм. Магнитная система имеет боковые «купольные» образования, которые находятся за пределами мишени и попадают в область расположения крепления мишени и других конструктивных элементов. Максимум паразитного распыления приходится на 67 мм, где B_y равно нулю. Индукция B_x в этой точке равна 0,07 Тл, что представляет достаточно большую величину, и требуются меры, предотвращающие это. Необходимо защищать область, где B_x больше 0,02 – 0,03 Тл. Это от 52 мм. Методов защиты много, это покрытие изоляционным материалом, чтобы исключить движение ионов, обеспечение плавающего потенциала в этих места для исключения движения тока, или их комбинация. Область распространения плазмы от поверхности мишени в сторону подложки ограничивается величиной 0,02 Тл. Плазма в данной конструкции магнитной системы распространяется до 38 мм, то есть имеет сравнительно приповерхностное горение. При этом магнитная система построена так, что на поверхности мишени индукция B_x имеет величину около 0,14 Тл, что обеспечивает зажигание разряда и, соответственно, работу магнетрона при более глубоком значении вакуума.

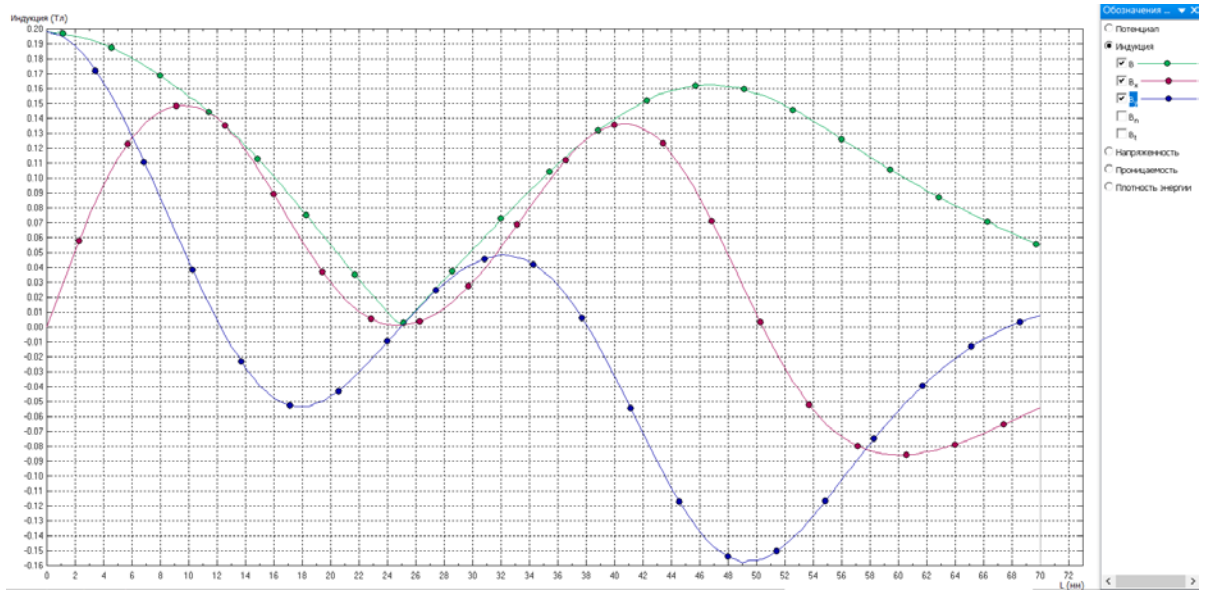


Рис. 1.1.2.4. График распределения индукции магнитного поля у поверхности мишени

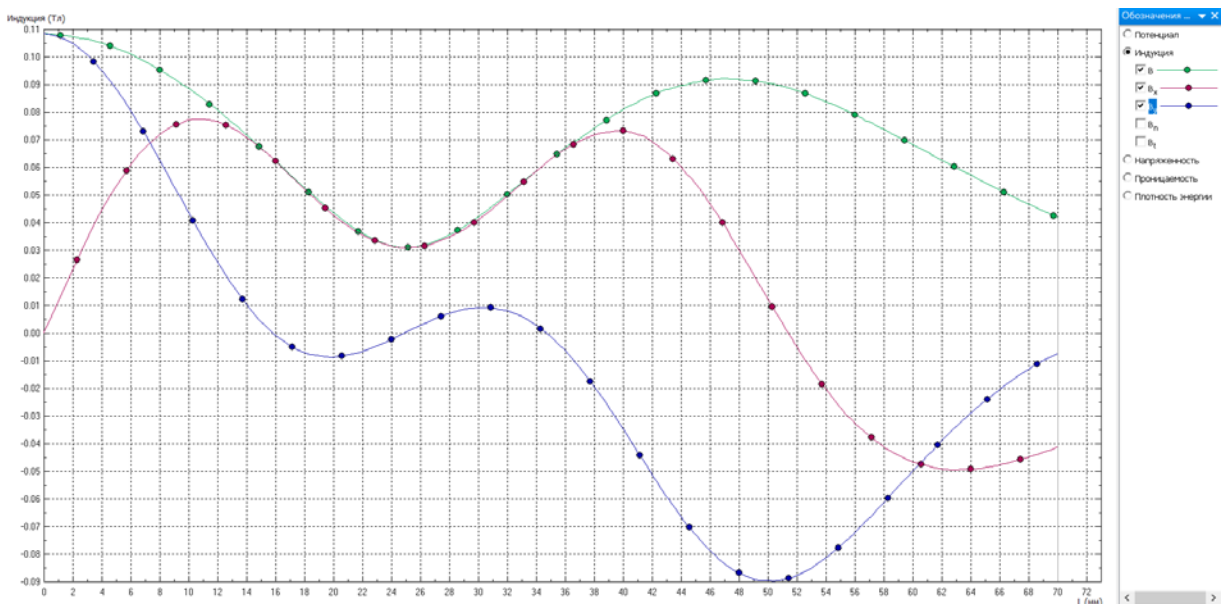


Рис. 1.1.2.5. График распределения индукции магнитного поля на расстоянии 5 мм от мишени

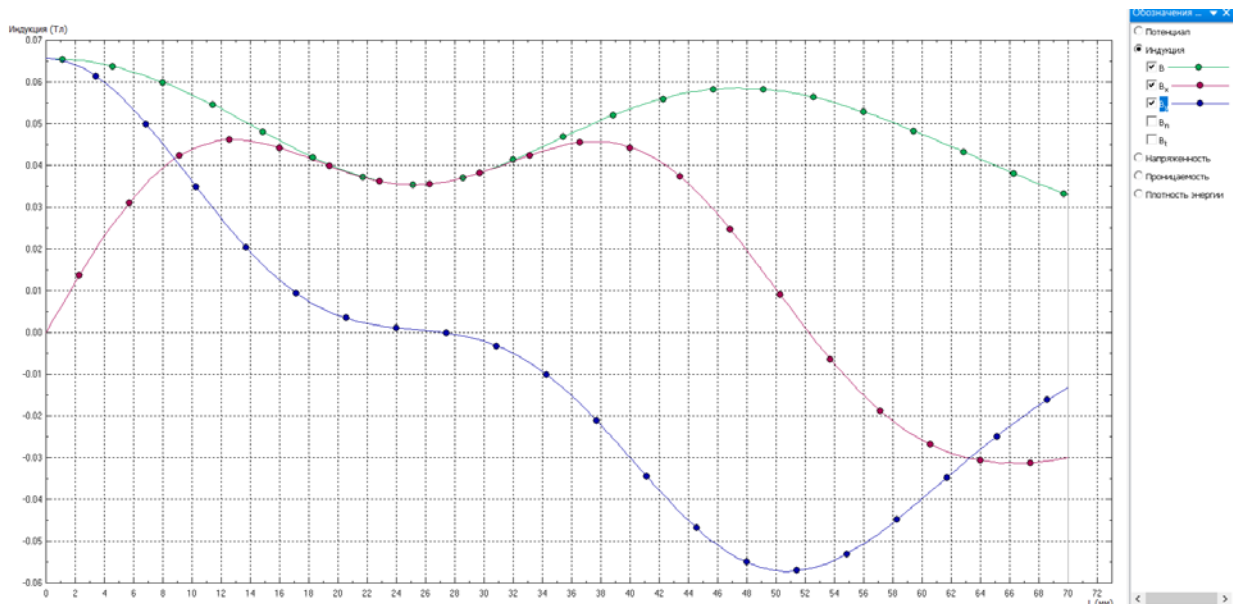


Рис. 1.1.2.6. График распределения индукции магнитного поля на расстоянии 10 мм от мишени

Расчёт прогнозируемой формы относительной эрозии мишени осуществляется с помощью оригинальной программы Pretarger. Входными данными для выполнения расчётов является таблица распределения индукции B и его компонент B_x и B_y над поверхностью мишени. Результат расчётов прогнозируемой формы эрозии при максимальном и минимальном режиме работы магнетрона представлен на рис. 1.1.2.7. При максимальном режиме магнетрона зона эрозии шире. Коричневым обозначен режим малой мощности. Ширина области эрозии распространяется от 1,5 мм до 50 мм. Эрозионная канавка распространяется от 9 мм до 42,0 мм, т.е. имеет ширину 33 мм. Коэффициент использования материала мишени составляет более 60% (33мм/50мм).

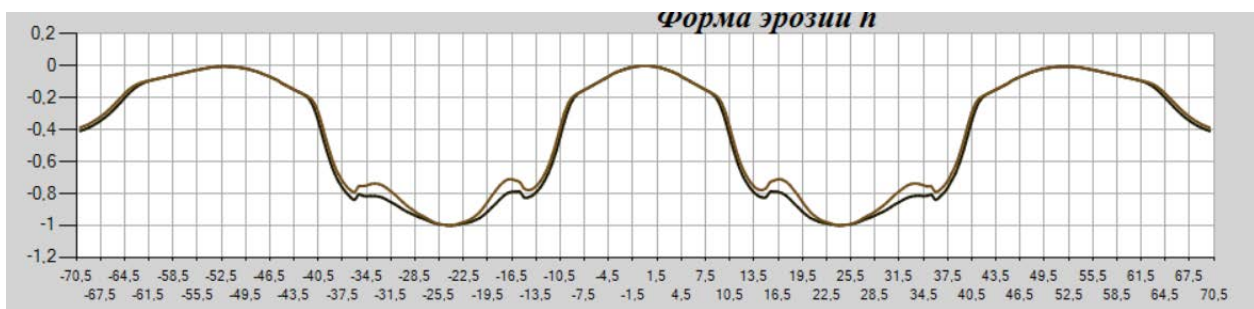


Рис. 1.1.2.7. График прогнозируемой формы эрозии при максимальном и минимальном режиме работы магнетрона

Исследование подемоторных сил, воздействующих на отдельные составляющие элементы магнитной системы проектируемого магнетрона, показали ошибочность применения центральной стальной пластины. Наличие стальной пластины толщиной 1 мм между центральными встречно направленными магнитами не выполняет своей функции, так как железо входит в насыщение и центральные магниты расталкиваются с большой силой.

Сжать расталкивающиеся магниты большой силы требует специального крепления. Это усложняет сборку магнитной системы.

Конструктивное решение №2

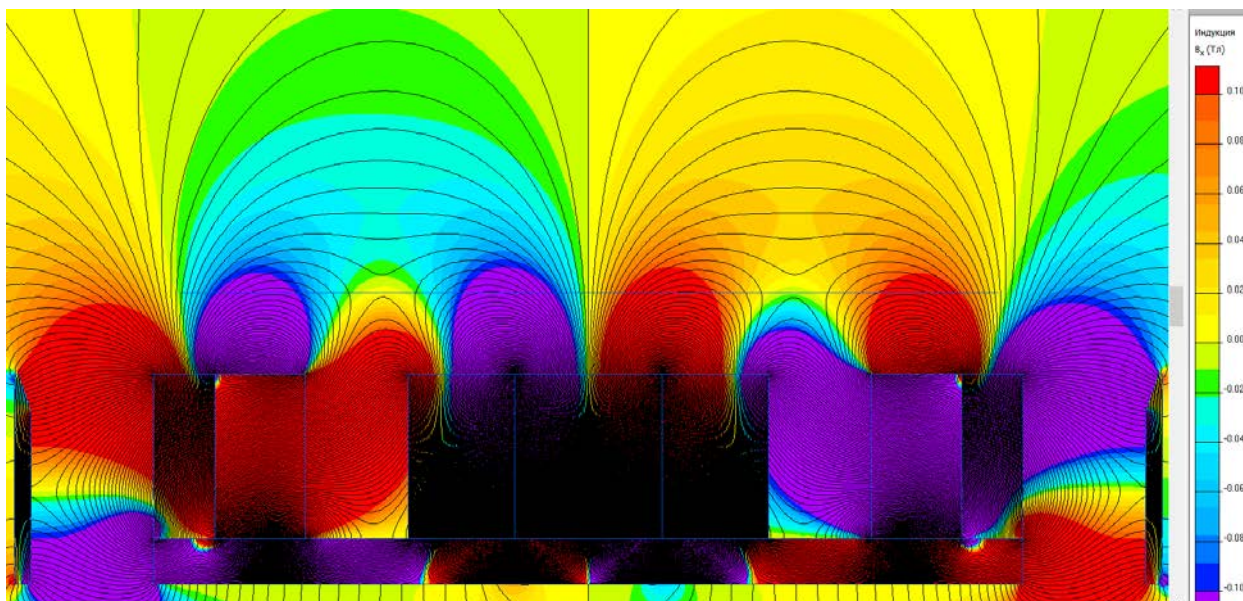


Рис. 1.1.2.8. Цветовая карта компоненты индукции магнитного поля B_x магнитной системы №2

Магнитная система №2 состоит из магнитов высотой 20 мм (слева направо от центра):

1. Центральный магнит шириной 18 мм, направление намагниченности направлена вверх;
2. Дополнительный к центральному магнит шириной 13 мм, имеющий вертикальное направление намагниченности сверху вниз, плотно прижат к центральному магниту (примагничен);
3. Промежуток 12,5 мм
4. Дополнительный к периферийному магнит шириной 11 мм, имеющий направление намагниченности к центру;
5. Периферийный магнит шириной 7,5 мм, имеющий горизонтальное направление намагниченности, направленное кверху вниз, плотно прижат к дополнительному магниту;
6. Промежуток 15 мм;
7. Экран Ст3 2 мм. Скос 4,5x1,5 мм, обращён внутрь.

Формула магнитной системы (правой половины):

$$0 \div 9 (\uparrow 18) \div 22 (\downarrow 13) \div 34,5 (\text{зазор } 12,5) \div 45,5 (\leftarrow 11) \div 53 (\downarrow 7,5) \div 68 (\text{зазор } 15) \div 70 (2\text{мм Ст3})$$

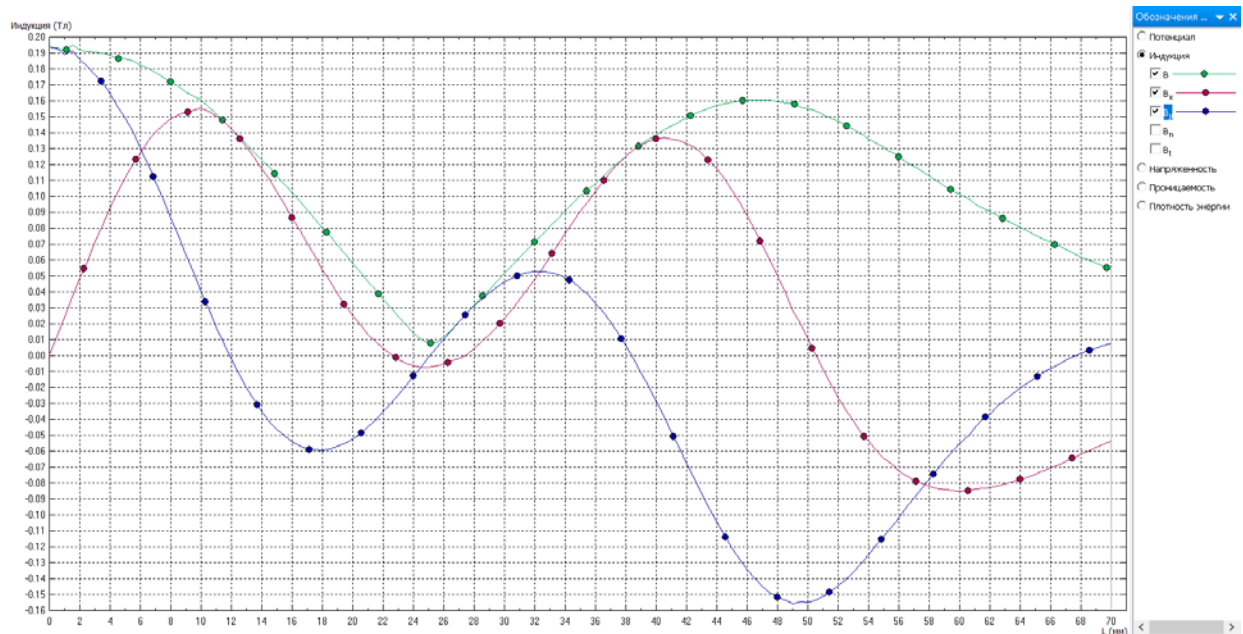


Рис. 1.1.2.9. График распределения индукции магнитного поля у поверхности мишени

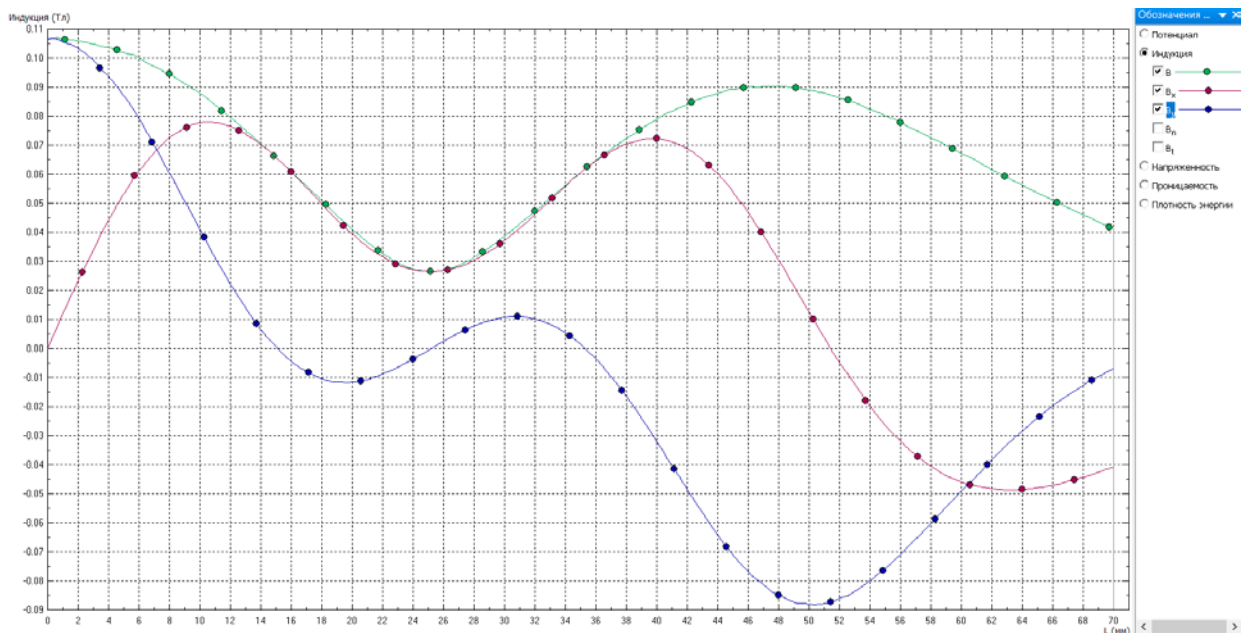


Рис. 1.1.2.10. График распределения индукции магнитного поля на расстоянии 5 мм от мишени

На рис. 1.1.2.8 представлены силовые линии магнитного поля и цветовая диаграмма компоненты индукции магнитного поля V_x магнитной системы №2. На графике рис. 1.1.2.9 приведено распределение индукции B магнитного поля и его компонент V_x и V_y на уровне поверхности мишени. На расстоянии 25 мм от центра мишени индукция B магнитного поля имеет отрицательное значение, т.е. добавляется плазменный шнур обратного направления. Центры «куполов» – 12 мм, 25 мм и 38,3 мм. Величина индукции V_x составляет около 0,155 Тл для первого «купола», второго около -0,1 Тл, третьего около 0,14 Тл. Эти значения немного больше, чем у магнитной системы №1, но ширина между крайними «куполами» меньше на 1 мм. На рис. 1.1.2.10 приведён график распределения индукции B и его компонент V_x и V_y на уровне 5 мм от мишени.

Центры «куполов» приходятся на 15 мм, 25 мм и 35 мм, что шире, чем у магнитной системы №1 и смещено к центру. Величины индукции B_x составляют 0,078 Тл, 0,025 Тл и 0,072 Тл соответственно. На рис. 1.1.2.11 приведён график распределения индукции B и его компонент B_x и B_y на уровне 10 мм от мишени. Здесь наблюдается единый «купол» с центром на 25,5 мм. Величина индукции B_x здесь составляет чуть менее 0,35 Тл. На рис. 1.1.2.12 приведён график распределения индукции B и его компонент B_x и B_y на уровне 15 мм от мишени. Максимум паразитного распыления магнитной системы №2 приходится также на 67 мм с такой же величиной индукции B_x в этой точке (около 0,07 Тл). В целом магнитная система очень похожа.

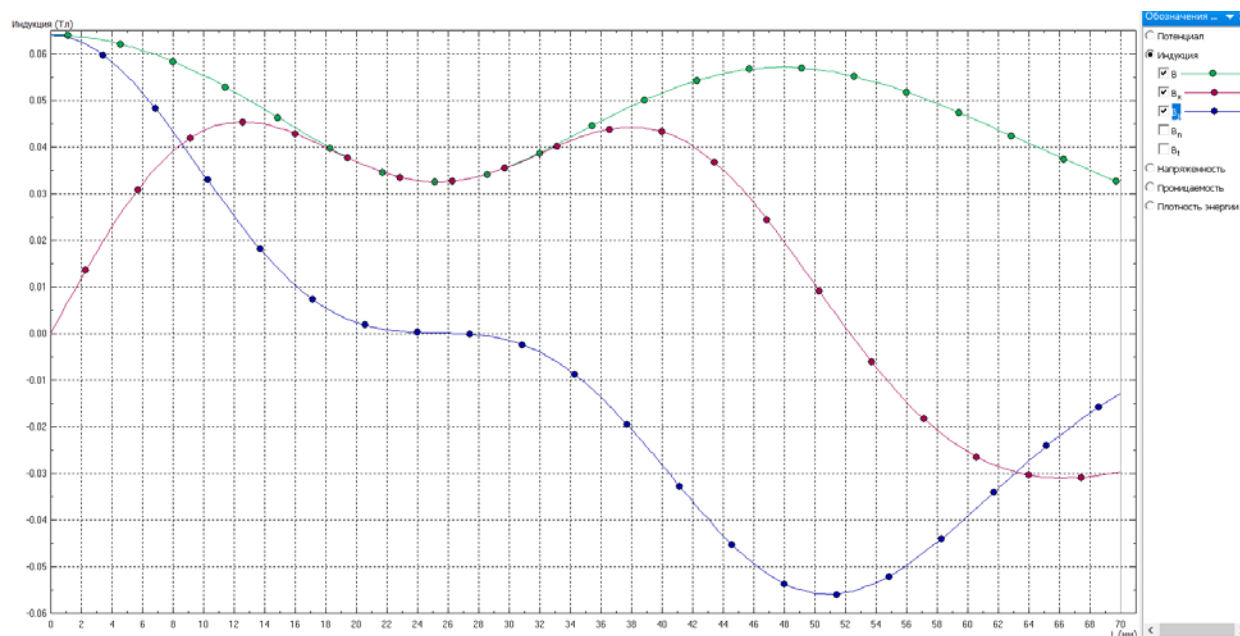


Рис. 1.1.2.11. График распределения индукции магнитного поля на расстоянии 10 мм от мишени

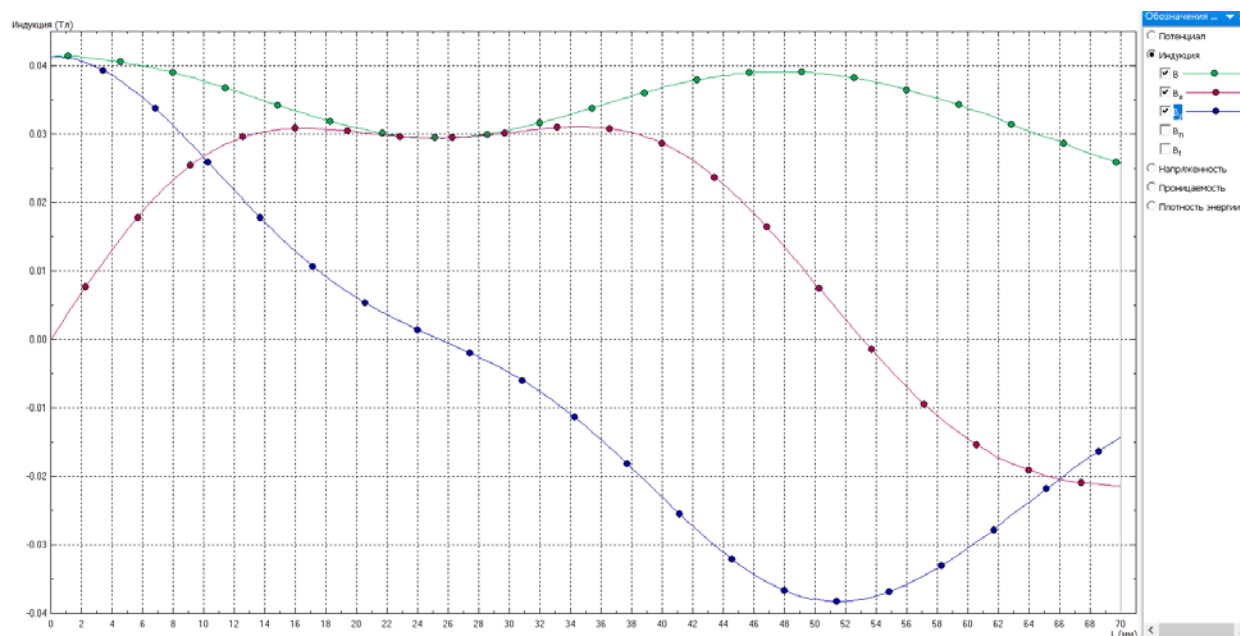


Рис. 1.1.2.12. График распределения индукции магнитного поля на расстоянии 15 мм от мишени

Расчёт прогнозируемой формы относительной эрозии мишени показал похожие результаты. Результат расчётов прогнозируемой формы эрозии при максимальном и минимальном режиме работы магнетрона представлен на рис. 1.1.2.13. При максимальном режиме магнетрона зона эрозии шире. синим обозначен режим малой мощности. Ширина области эрозии распространяется от 1,5 мм до 50 мм. Эрозионная канавка распространяется от 9 мм до 42,0 мм, т.е. имеет ширину 33 мм. Коэффициент использования материала мишени составляет более 60% (33мм/50мм).

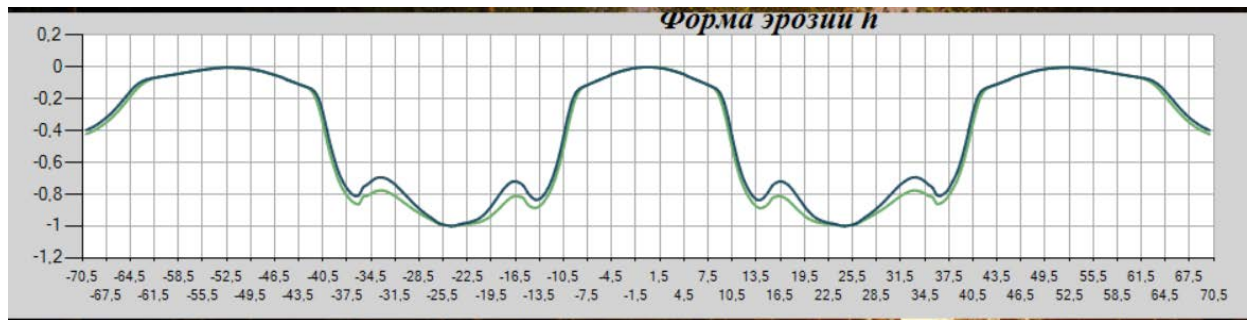


Рис. 1.1.2.13. График прогнозируемой формы эрозии при макс. и мин. работы магнетрона

Магнитная система составлена из магнитов, легко собираемых в центральной зоне и требующих склейки или незначительного прижима в периферийной части. В целом магнитная система технически собираемая и взята за основу при проектировании магнетронов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1.1.2.1] Д.А. Д.В. Духопельников «Магнетронные распылительные системы. Ч. 1, Устройство, принцип работы, применение», М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [1.1.2.2] С.Д. Гришин, Л.В. Лесков, Н.П. Козлов «Электрические ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1975. – С. 272.
- [1.1.2.3] А.И. Морозов «Физические основы космических электрореактивных двигателей. Элементы динамики потоков в ЭРД» М.: Атомиздат, 1978. – С. 328.
- [1.1.2.4] ELCUT программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tor.ru/elcut/>

Приложения.

1. Конструкторская документация. Прилож.1.1.2_2.pdf

1.1.3. Тестовые нанесения карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на полимерные плёнки из лавсана (Mylar) и полиимида (Kapton).

Введение

Возможность нанесения тонкоплёночных покрытий карбида бора B_4C , обогащенного изотопом ^{10}B , на полимерные плёнки даёт возможность создания новых детекторов нейтронов, которые будут обладать лучшими характеристиками по сравнению с детекторами, использующими в качестве конвертера нейтронов тонкоплёночные покрытия $^{10}\text{B}_4\text{C}$, наносимые на алюминиевые листы. Появляется возможность повышения плоскостности, что даст возможность повысить требования к геометрии детектора и уменьшить зазор анод-катод. Это в свою очередь ведёт к улучшению временного и пространственного разрешения, в том числе к повышению загрузочной способности.

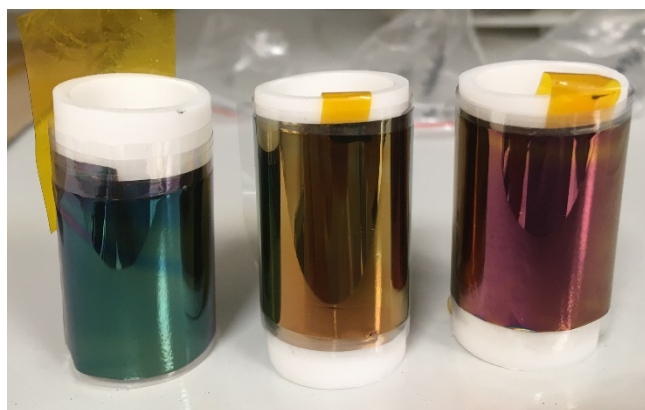


Рис. 1.1.3.1. Лавсановая плёнка с тонкоплёночным $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

Слева-направо:
Бирюзовый – 160 нм,
Жёлтый – 100 нм,

выполнены на вакуумной установке VSR-300 (сборка компании РОБВАК, г. Фрязино). Данные работы являются продолжением работ по нанесению карбида бора на подложки из алюминиевых листов и выполнены на том же оборудовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1.1.3.1 приведены фотографии лавсановых плёнок с покрытием $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Тестовые нанесения $^{10}\text{B}_4\text{C}$ выполнялись при предварительном прогреве камеры при давлении $5 \cdot 10^{-6}$ мТорр и



температуре 130°C в течении 180 минут. Далее, после охлаждения камеры с плёночными подложками до 35°C выполнялась очистка подложек потоком ионов от ионного источника, работающего при напряжении 1500В и ионном токе 50 – 70 мА. Покрытие слоем алюминия толщиной около 70 нм выполнено при мощности магнетрона с алюминиевой мишенью 1 кВт с экспозицией 5 минут. При этом наблюдался нагрев камеры до 55°C , что требовало очередного охлаждения до 35°C . Нанесению карбида бора осуществлялось послойно с остановками при повышении температуры в камере более 55°C .

Рис. 1.1.3.2. Лавсановая плёнка с тонкоплёночным $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

Мощность магнетрона с мишенью из карбида бора составляла 0,85 кВт. Толщина слоя карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ определялась длительностью экспозиции. Изготовлены по четыре образца с покрытием карбидом бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ разной толщины лавсановых (Mylar) и полиимидных (Kapton) плёнок с областью нанесения $^{10}\text{B}_4\text{C}$ размером 250x250 мм. На рис. 1.1.3.2 приведена фотография образца № 1

В таблицу 1.1.3.1 сведены характеристики полученных образцов.

Таблица 1.1.3.1.

Основные характеристики полученных образцов полимерных плёнок с покрытием $^{10}\text{B}_4\text{C}$

Образец	Дата	Подложка	Экспозиция $^{10}\text{B}_4\text{C}$, минут	Толщина $^{10}\text{B}_4\text{C}$	Цвет
№1	07.11.2021	лавсан	45	130	пурпурный
№2	0.9.11.2021	лавсан	60	160	бирюзовый
№3	12.11.2021	лавсан	30	100	жёлтый
№4	14.11.2021	лавсан	150	450	серо-зелёный
№5	15.11.2021	полиимид	160	500	серый
№6	17.11.2021	полиимид	55	150	синий
№7	21.11.2021	полиимид	45	130	пурпурный

№8	24.11.2021	полиимид	30	100	жёлтый
----	------------	----------	----	-----	--------

Толщины слоя карбида бора даны оценочно. Точные значения будут получены при проведении исследований свидетелей, представляющих собой полированные кремниевые пластины, устанавливаемые в центральной части барабана с подложками.

ВЫВОДЫ

Методом магнетронного распыления при ионном ассистировании получены плотные плёнки В₄С с высокой адгезией к подложкам из полимерных лавсановых и полиимидных плёнок. Полученные образцы предназначены для дальнейших исследований на детекторах нейтронов в качестве конвертерного материала.

Приложения.

1. Акт изготовления. Файл Прилож.1.1.3_1.pdf
2. Отчёт по нанесению карбида бора на полимерные плёнки. Файл Прилож.1.1.3_2.pdf

1.1.4. Реконструкция вакуумной напылительной системы VSR300 под магнетронное нанесение $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на рулонные материалы из полимерных плёнок и металлической фольги.

(1 очередь)

В настоящее время в исследовательских центрах мира наблюдается повышенный интерес к развитию нейтронных исследований. Идёт строительство новых исследовательских центров (например, European Spallation Source (ESS) в Швеции, ПИК в России) и развитие приборно-инструментальной базы для оснащения экспериментальных станций нейтронных источников ранее построенных распределительных источников (Spallation Source) научных исследовательских центров. Это связано с уникальными возможностями исследования материи с помощью нейтронного излучения.

К настоящему времени изготовлено большое количество детекторов с применением тонкого слоя конвертера B_4C . Все они относятся типу газоразрядных детекторов. В качестве показателя состояния техники и мирового уровня развития приборно-инструментальной базы можно рассмотреть требования к газоразрядным детекторам, применяющим алюминиевые листы толщиной 0,5 мм с конвертером из тонкослойного карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, и предназначенным для приборов строящегося ведущего Европейского распределительного источника ESS, Лунд, Швеция. Требования приведены в таблице 1.1.4.1.

Таблица 1.1.4.1. Требования к детекторам на основе $^{10}\text{B}_4\text{C}$ (ESS, г.Лунд, Швеция)

Наименование прибора	Диапазон, Å	Временное разрешение, мкс	Пространственное разрешение, мм ²	Площадь детектора, м ²	Плотность потока, н/с/см ²
LOKI Small Angle Neutron Scattering	3-20	100	2x8	10	10 ⁹
SKADI Small Angle Neutron Scattering	2-18	100	5x10	20	10 ⁹
ESTIA Vertical Reflectometer	5-9,4	100	1x8	0,25	10 ⁹

FREIA Horizontal Reflectometer	2-23	100	0,5x2	0,16	10 ⁹
C-SPEC Cold Chopper Spectrometer	1,5-20	10	25x25	47,47	10 ⁷
VOR Bi-Spectral Chopper Spectrometer	0,8-20	10	20x20	25,65	10 ⁷
CAMEA Inverse TOF Spectrometer	1-8	10	5x5	2,4	10 ¹⁰
POWTEX Bi-Spectral Powder Diffractometer	0,5-20	10	2x2	11,69	10 ⁹
HEIMDAL Thermal Powder Diffractometer	1-13	100	3x3	15,002	10 ⁹
BEER Material Science & Engineering Diffractom.	0,1-7	10	2x5	6,4925	10 ⁷

Из таблицы видно, что современные детекторы нейтронов имеют большую регистрирующую площадь, т.е. для создания современных детекторов на основе конвертера $^{10}\text{B}_4\text{C}$ необходимо обеспечить нанесение тонкого слоя карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на подложки большой площади. Для детекторов ESS разработана технология нанесения $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на подложки из алюминиевых листов толщиной 0,5 мм большой площади.

Оригинальная методика, разработанная в ОИЯИ совместно с государственным университетом «Дубна» позволяет выполнять магнетронное нанесение $^{10}\text{B}_4\text{C}$ при понижении температуры в камере до 50°C, что позволяет применять в качестве подложки алюминиевую фольгу

и полимерные плёночные материалы, а именно полиимидную (Каптон) и лавсановую (Майлар) плёнки. Опробовано нанесение конвертера $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной 50, 80, 300 и 500 нм на алюминиевую фольгу толщиной 20 мкм, на полиимидную пленку толщиной 20 мкм и на лавсановую плёнку толщиной 20 мкм. Применение в детекторах на основе тонкого слоя конвертера $^{10}\text{B}_4\text{C}$ вместо подложки из алюминиевых листов подложки из полимерных плёнок существенно улучшает характеристики детекторов за счёт уменьшения толщины подложек и повышения плоскостности конвертерного слоя. Поэтому создание установки, позволяющей наносить тонкоплёночный $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на полимерные плёнки большой площади, позволит создавать самые современные детекторы нейтронов.

К настоящему времени разработана конструкция и изготавливается промышленная проходная вакуумная установка линейного типа для магнетронного нанесения карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на алюминиевые листы, алюминиевую фольгу и полимерные материалы рабочей площадью 400x1200 мм, планируемая к размещению в лаборатории нейтронной физики (ЛНФ ОИЯИ). Изготовление и монтаж установки планируется завершить в 2022 году. Сейчас используется лабораторная установка VSR300 для нанесения конвертера $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на алюминиевые подложки толщиной 0,5 мм размером 250x250 мм, что позволяет изготавливать детекторы нейтронов различного типа с рабочей областью до 250x250 мм. Введение в строй в 2022 году промышленной установки даст возможность увеличить площадь конвертера до 400x1200 мм. Это позволит изготавливать детекторы с гораздо большей рабочей областью, подобные детекторам, изготавливаемым в Швеции.

Перенесение оригинальной собственной методики вакуумного нанесения $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на полимерные плёнки к нанесению $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на рулонные материалы даст возможность создания уникальных детекторов нейтронов как по площади, так и по пространственному и временному разрешению. В том числе появится возможность изготавливать в ОИЯИ новый класс straw-детекторов диаметром 5 мм или 10 мм и длиной до 3000 мм.

Первым шагом в достижении поставленной цели является модернизация имеющейся лабораторной вакуумной установки VSR300 под нанесение $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на рулонные материалы. Выполнение модернизации установки VSR300 должно обеспечить включение в состав установки следующих основных узлов:

- a) Устройство перемотки;
- b) Магнетронный распылитель;
- c) Ионный источник;
- d) Монтажные фланцы с вводами или отдельные вводы;
- e) Инвертор питания магнетрона;
- f) Инвертор питания ионного источника.

Конструктивные требования к модернизации вакуумной установки VSR300:

1) Магнетронный распылитель с косвенным охлаждением мишени должен иметь сбалансированную магнитную систему под мишень размером 400x100 мм и обеспечивать высокий коэффициент использования материала мишени.

2) Устройство перемотки должно иметь механизм перемотки, обеспечивающий загрузку рулона лавсановой плёнки толщиной 20-30 мкм, шириной 400 мм и длиной не менее 100 м, размещённую на бобине стандартного диаметра. Привод устройства перемотки должен обеспечивать скорость в диапазоне 1-100 мм/мин. Должна быть предусмотрена реверсивная перемотка пленки. Вал механизма перемотки, расположенный в зоне нанесения покрытия, должен охлаждаться проточной водой. Механизм перемотки должен быть изолирован от корпуса вакуумной камеры.

3) Инвертор питания магнетрона должен быть униполярным мощностью не менее 4,5 кВт и с возможностью регулировки частоты от 0 до 100 кГц.

4) Магнетронный распылитель и устройство перемотки должны быть укомплектованы необходимыми вакуумными вводами или установочными портами с вакуумными вводами, а также необходимыми элементами для монтажа внутри вакуумной камеры.

Разработан эскизный проект модернизации установки VSR300 в составе:

- Сборочный чертёж,
- Чертёж изменений конструкции установки,
- Чертежи дополнительных узлов,
- Схемы.

В 2022 году планируется модернизацию установки VSR300 завершить и ввести её в эксплуатацию для изготовления тонкослойных конвертеров $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на полимерных плёнках в рулонах.

Приложения.

1. Конструкторская документация. Файл Прилож.1.1.4.pdf

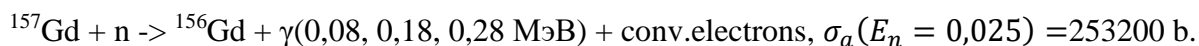
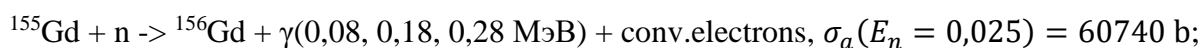
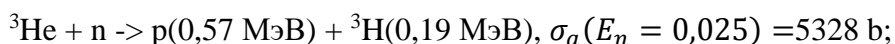
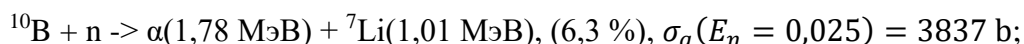
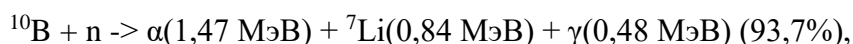
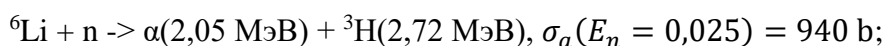
1.1.5. Газовый детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на алюминиевой подложке. (1 очередь)

Импульсный реактор ИБР-2 является основной исследовательской установкой Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка и базовой установкой ОИЯИ. Номинальная мощность реактора составляет 2 МВт, а длительность импульса составляет 320 мкс. Плотность потока тепловых нейтронов с поверхности теплового замедлителя составляет $10^{13}\text{н}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$. Реактор ИБР-2 имеет 14 исследовательских каналов для вывода нейтронных пучков, предназначенных для проведения исследований конденсированных сред и биологических систем методами рассеяния нейтронов. В каналах вывода формируются пучки нейтронов, которые направляются на специализированные установки, каждая из которых оборудована системой детектирования нейтронного излучения, адаптированной к методике измерений, применяемой на установке.

Одно из важнейших направлений исследований является развитие существующих и создание новых технологий, на основе которых создаются детекторы нейтронов для экспериментальных установок реактора ИБР-2.

Нейтроны не являются прямо ионизирующим излучением, поскольку не имеют электрического заряда. Для их регистрации применяются конвертерные материалы и регистрируются вторичные заряженные частицы, образованные в результате взаимодействия нейтронов и атомных ядер материала конвертера.

Для повышения эффективности регистрации тепловых нейтронов применяются материалы с большими сечениями захвата тепловых нейтронов, такие как ^6Li , ^{10}B , ^3He , ^{155}Gd и ^{157}Gd . Наиболее распространёнными ядерными реакциями, используемыми в детекторах тепловых нейтронов, являются:



В настоящее время в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка, ОИЯИ освоены технологии изготовления 2-х типов нейтронных детекторов: газовых на основе ^3He и сцинтилляционных на основе $^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$.

Перспективным направлением развития существующих детекторов в ОИЯИ является разработка детекторов на основе карбида бора B_4C , которые находят широкое применение в

мировых научных центрах, таких как: European Spallation Source (ESS) и Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) и используются в качестве замены детекторов на основе ^3He .

В ЛНФ, Научно-экспериментальный отдел комплекса спектрометров (НЭОКС) ИБР-2 в рамках исследовательской программы (проекта) по теме: “РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ ИСТОЧНИКОВ ИМПУЛЬСНОГО ИЛИ ПОСТОЯННОГО ТИПА”

разрабатывается газовый детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B_4C на алюминиевой подложке.

Детектор предназначен для канала № 4 реактора ИБР-2 - установка ЮМО (Спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов) и будет использоваться в качестве монитора тепловых нейтронов.

Благодаря низкой эффективности данный тип детектора может быть использован для измерения интенсивности прямого нейтронного пучка, так как выдерживает большие загрузки и имеет длительное время эксплуатации. Детектор работает в пропорциональном режиме при минимальном газовом давлении для исключения создания большого объемного заряда.

Результаты измерений с помощью этого детектора повысят качество экспериментальных данных, полученных с помощью методов малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН), вариации контраста и метода меток.

С помощью этих методов на спектрометре ЮМО может быть получена следующая информация:

- Размеры, пространственные корреляции и форма частиц, агломератов, пор и (или) фрактальная размерность кристаллических, аморфных образцов, коллоидных растворов, биологических объектов в диапазоне от 1 нм до нескольких сотен нанометров;
- Структурные изменения при фазовых переходах;
- Степень полидисперсности;
- Агрегационное число;
- Молекулярный вес;
- Определение плотности объекта;
- Исследование однородности объектов.
- Анализ плотности распределения изучаемых объектов

Согласно пункта 1.1.5 «Газовый детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B_4C на алюминиевой подложке» плана графика, была разработана конструкторская документация: сборочные чертежи и чертежи деталей. На Рисунке 1.1.15.1. представлен сборочный чертеж детектора.

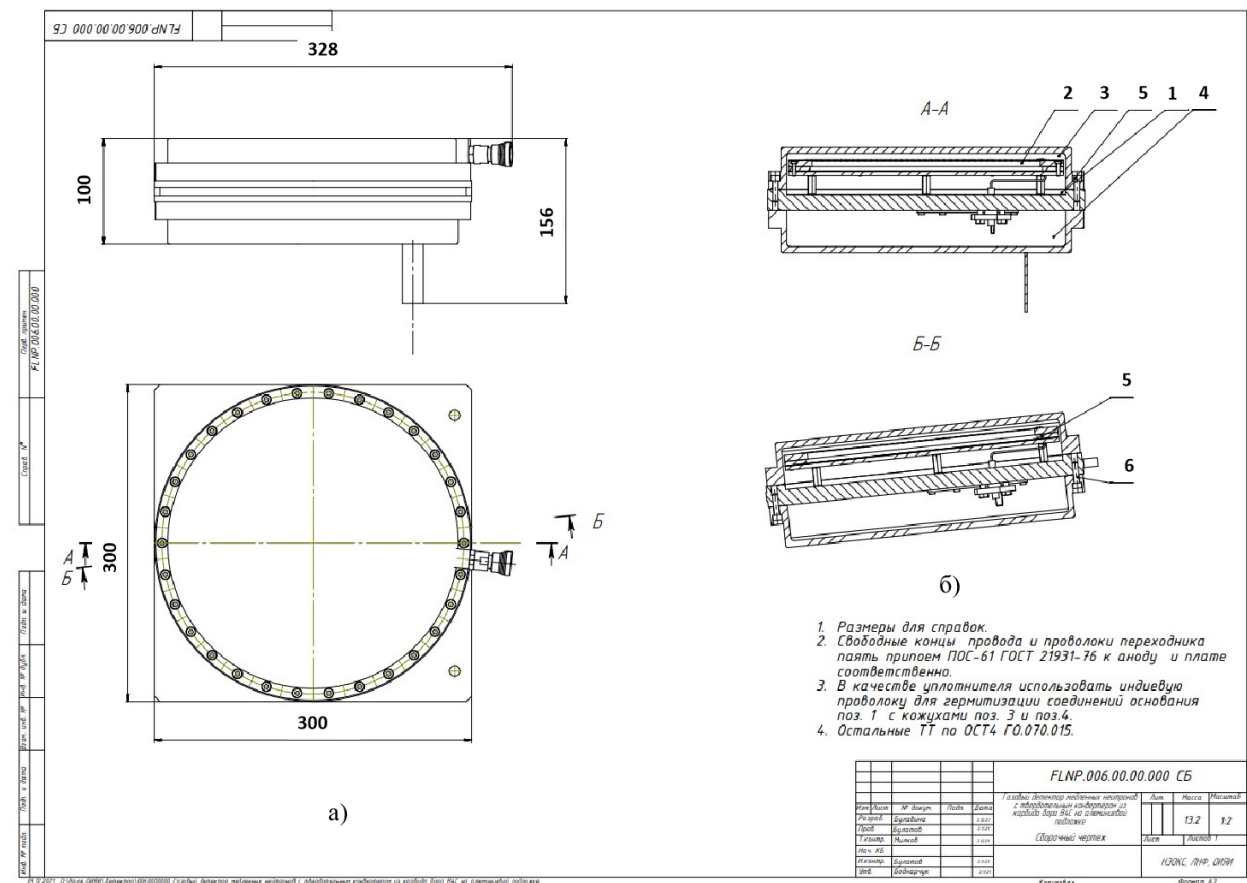


Рисунок 1.1.15.1. Газовый детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером В₄С на алюминиевой подложке: а) Внешний вид детектора - корпус (кожух) - материал АМГ6; б) Разрез детектора: 1. Платформа; 2. Детектор с твердотельным конвертером из В₄С на алюминиевой подложке и анодная плоскость; 3, 4. Корпус (кожух).

Детектор представляет собой цилиндрическую пропорциональную многопроволочную камеру низкого давления. Корпус (кожух) изготовлен из алюминиевого сплава АМГ6, его внешний диаметр составляет 300 мм (вместе с газовым разъемом 338 мм), внутренний 264 мм, высота 100 мм (вместе с трубкой подвода атмосферного давления 156 мм), толщина входного окна 6 мм, максимальная площадь детектирующей области составляет 366 см². Габариты детектора обусловлены профилем пучка нейтронов и требуемой эффективностью регистрации. Толщина входного окна не приводит к значительному ослаблению проходящего потока нейтронов и в то же время обеспечивает механическую надёжность конструкции детектора.

В объеме детектора расположен твердотельный конвертер из карбида бора В₄С на алюминиевой подложке, выполняющий роль катода, и одна анодная плоскость расположенная на расстоянии 10 мм от катода. Анодная плоскость представляет собой текстолитовую рамку в форме кольца с внешним диаметром 260 мм, внутренним диаметром 216 мм и высотой 6 мм с натянутыми тонкими позолоченными проволоками диаметром 50 мкм и шагом 5 мм.

Для регистрации нейтронов используется рабочая газовая смесь Ag +CO₂ (90:10) при атмосферном давлении.

В процессе разработки документации были приняты следующие конструкторские решения, исходя из технических характеристик канала № 4 реактора ИБР-2 - установка ЮМО:

- Работы детектора в вакуумной системе обеспечивается уплотнением индием корпуса детектора и корпуса с крышкой, закрывающей детекторную электронику.
- Обеспечен дополнительный подвод атмосферного давления к детекторной электронике, который позволит обеспечить работу детекторной электроники в нейтроноводе в условиях вакуума.
- Используется газовый разъем типа “быстрого подключения” марка Swagelok Company в боковой части детектора, который позволит проводить перезаполнение детектора газовой смесью непосредственно на экспериментальной установке.

В детекторной электронике будут использоваться радиационно-стойкие компоненты, которые позволят работать детектору в прямом нейтронном пучке.

Приложения.

1. Конструкторская документация. Файл Прилож.1.1.5.pdf

1.1.6. Позиционно-чувствительный мониторный детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$. (1 очередь)

Позиционно-чувствительный мониторный детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B_4C является дальнейшим развитием детекторов тепловых и холодных нейтронов, представляющих собой газовые многопроволочные пропорциональные камеры (Multi Wire Proportional Chambers – MWPC), состоящие из системы электродов (анода и катода), размещённых в герметичном корпусе, заполненных газовой смесью. В детекторах MWPC несколько тонких проволочек, размещённых в ряд с определённым шагом в одной плоскости, выступают в качестве анода, а катодом является размещённая на определённом одинаковом расстоянии от плоскости анода токопроводящая поверхность на плоской подложке. В качестве конвертера нейтронов (преобразователя нейтронов в регистрируемые заряженные частицы) может выступать сам газ, либо тонкий слой твердотельного конвертера, нанесённого на поверхность катода. Для определения координаты места события конвертации (захвата) нейтрона используются анодные проволочки и токопроводящие стрипы (strips – полоски), нанесённые на катод и/или на дополнительно введённую в камеру подложку. При этом они ориентируются во фронтальной плоскости детектора таким образом, что анодные проволочки ориентированы вдоль одной координаты (например, X), а стрипы ориентированы вдоль другой координаты (соответственно, Y), а Z – координата ориентирована вдоль оси пучка нейтронов.

Современные исследовательские источники нейтронов, в особенности строящиеся, например, ПИК (г. Гатчина, Россия), особенно ESS (г. Лунд, Швеция), где планируется получить самый мощный поток нейтронов, для проведения исследований на нейтронных рефлектометрах, нуждаются в разработке новых детекторов, которые, в отличие от широко используемых гелиевых детекторов, будут обладать лучшим пространственным и временным разрешением, более высокой скоростью счёта и при этом иметь не меньшую чувствительность и большую площадь чувствительной области.

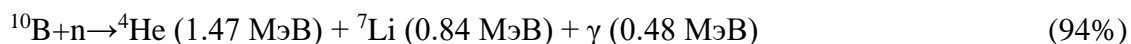
Гелиевые MWPC – детекторы, построенные по технологии применения в качестве конвертера и одновременно рабочего газ, состоящий из изотопа гелия ^3He , ограничены скоростью счёта, которая у них может достигать 10 кГц/мм^2 [1.1.6.1]. Пространственное разрешение, которое может быть достигнуто с применением технологии на основе ^3He , составляет около 1,5 мм. Одной из актуальных неразрешимых проблем гелиевых детекторов является наличие толстого входного окна, использование которого связано с необходимостью применения высокого давления газа ^3He (3 -20 бар) для повышения эффективности регистрации нейтронов. Это приводит к рассеиванию нейтронов на входном окне на уровне около 10^{-2} . Однако, по эффективности, составляющей 50 – 90 % в диапазоне 2,5 – 30 Å [1.1.6.2], эта технология превосходит другие существующие технологии.

В MWPC – детекторах, построенных по технологии применения в качестве конвертера нейтронов тонкого слоя изотопа ^{10}B , а именно карбида бора B_4C , обогащённого по изотопу ^{10}B до 96%, за счёт подбора рабочего газа может быть получена высокая скорость счёта и, следовательно, загрузочная способность и временное разрешение в 10 – 100 раз больше, чем в детекторах по технологии ^3He . Эффективность регистрации нейтронов при размещении плоского твердотельного конвертера ^{10}B перпендикулярно оси пучка нейтронов составляет около 4 %. Эффективность можно значительно увеличить при наклоне конвертера так, чтобы его поверхность находилась под скользящим углом α к оси пучка нейтронов. Это связано с увеличением длины пути нейтронов в слое конвертера, то есть для нейтронов увеличивается эффективная толщина $d_{\text{эф}}$ конвертерного слоя физической толщины d :

$$d_{\text{эф}} = \frac{d}{\sin\alpha} \quad (1.1.6.1)$$

Для угла $\alpha = 5^\circ$ эффективная толщина $d_{\text{эф}}$ больше физической толщины d в 11,5 раз.

В результате захвата нейтрона изотопом бора ^{10}B происходит возбуждение ядра и распад с образованием двух ионов – изотопа лития ^7Li и альфа-частицы ^4He по двум каналам:



Причём, частицы ^4He и ^7Li разлетаются практически в противоположные стороны.

С одной стороны, чем толще слой конвертера, тем большее количество нейтронов прореагирует с ним. С другой стороны, в толстом конвертере альфа-частица и ион ^7Li , образующиеся в результате захвата нейтрона и распада изотопа ^{10}B , могут из него не выйти и не будут зарегистрированы. Длина пробега в материале конвертера B_4C альфа-частицы составляет около 3,4 мкм, а ^7Li – 1,7 мкм [1.1.6.3]. Компромиссным решением с целью регистрации наибольшего количества частиц и получения максимальной эффективности при выходе частиц с энергиями, позволяющими уверенно их зарегистрировать, является толщина слоя конвертера около 1 мкм.

Одним из наиболее удачных попыток создания детектора тепловых и холодных нейтронов на основе конвертера из карбида бора B_4C является детектор Multi-Blade, описанный в работе авторов F. Piscitelli и др. «The Multi-Blade Boron-10-based Neutron Detector for high intensity Neutron Reflectometry at ESS» [1.1.6.4]. Детектор представляет собой объединённые в единый герметичный корпус параллельно стоящие многопроволочные непрерывно продуваемые рабочим газом при атмосферном давлении пропорциональные камеры.

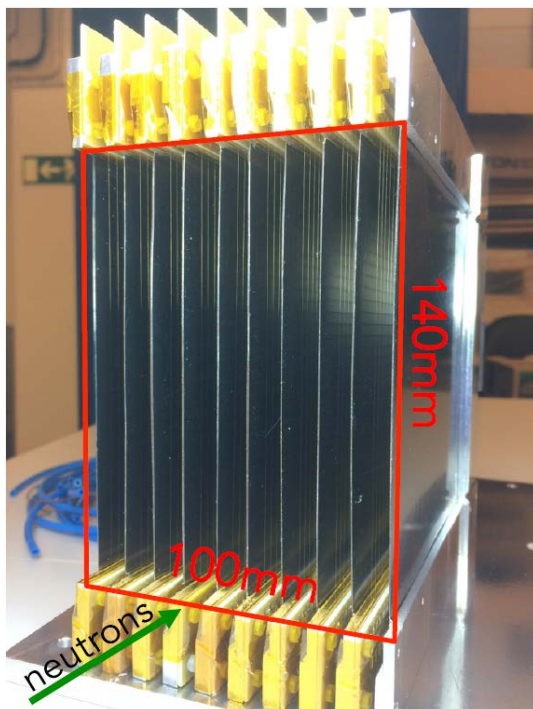


Рис. 1.1.6.1. Фотография детектора Multi-Blade.

Камеры выполнены как одинаковые независимые ячейки со своим катодом, анодом и стриповой системой. Катод представляет собой плоскую подложку с нанесённым на неё тонким слоем конвертера нейтронов на основе твердотельного соединения бора, обогащённого изотопом ^{10}B . Камеры наклонены на малый угол α относительно оси падающего пучка нейтронов так, что нейтроны входят в конвертер под скользким углом этой же величины относительно плоскости катода. Анод представляет собой расположенные в одной плоскости, отстоящей на одинаковом расстоянии от конвертера, параллельные проволочки с определённым одинаковым шагом, определяющим первую координату (например, X-координату) и её разрешение, и установленные перпендикулярно оси падающего пучка нейтронов. Концы

проволочек закреплены на пластинах из изоляционного материала с контактными площадками под каждую проволочку. Стриповая система представляет собой токопроводящие параллельные полосы одинаковой ширины m , нанесённые с определённым шагом n , определяющим вторую координату (соответственно, Y координату) и её разрешение. Стрипы нанесены на катод и/или на дополнительно введённую в камеру подложку и электрически изолированы от катода, направление которых перпендикулярно анодным проволочкам таким образом, что анодные проволочки ориентированы вдоль одной координаты (координаты X), а стрипы ориентированы вдоль другой координаты (координаты Y), а третья координата (Z координата) ориентирована вдоль оси пучка нейтронов.

Эффективность регистрации нейтронов детектором Multi-Blade имеет 44% для нейтронов длиной волны $2,5 \text{ \AA}$, 56% для $4,2 \text{ \AA}$ и 65% для $5,1 \text{ \AA}$. Эти значения обеспечиваются в основном за счёт уменьшения экранирования торцом подложки и уменьшения рассеивания нейтронов веществом подложки. Экранирование нейтронов торцом подложки, имеющей толщину 2 мм, уменьшено с помощью выполнения выборки под углом α торца подложки, обращённого к падающему пучку нейтронов, со стороны противоположной от конвертерного слоя, так, что подложка принимает вид лезвия или ножа (blade), направленного к падающему пучку. Исключение рассеивания нейтронов подложкой получено за счёт того, что толщина слоя конвертера B_4C сделана $7,5 \text{ мкм}$, в связи с чем весь поток нейтронов поглощается конвертерным слоем и практически полностью исключается его проникновение в подложку. Авторами детектора проведены испытания опытного образца детектора с углом поворота $\alpha = 5^\circ$. Образец собран при: $h = 4 \text{ мм}$ (расстояние

анод-катод-стрипы), шаг $s = 4$ мм (между анодными проволочками), ширина стрипов $m = 4$ мм. Конвертер, нанесённый на подложку, имеет размер $2 \times 100 \times 140$ мм. Пространственное разрешение опытного детектора составило $0,5 \times 2,5$ мм. Предельная скорость оценена по аналогии с аналогичными детекторами, не имеющими наклона конвертерного слоя и ожидается около 10^5 Гц/мм² [1.1.6.4].

Недостатком детектора Multi-Blade является искажение характеристик в начале каждой камеры. Это связано с наличием выборки с торца подложки под углом α , которая имеет неравномерную толщину и занимает заметную часть (около 25% – при угле поворота $\alpha = 5^\circ$ ширине 100 мм и толщине 2 мм). На этой длине плавно изменяется расстояние анод-стрипы камеры (стрипы находятся под потенциалом катода), что искажает электрическое поле в газоразрядной камере и создаёт неоднородность как в отдельной камере, так и во всем детекторе. Кроме этого, важным фактором является неустранимое неодинаковое нарушение плоскостности каждой подложки, связанное с её деформацией под воздействием напряжений в достаточно толстом (7,5 мкм) конвертерном слое, устранение которой за счёт увеличения толщины подложки может привести к увеличению глубины и длины выборки на обратной стороне подложки и к увеличению величины зазора между анодом и стрипами и его протяжённости, что усилит искажение электрического поля между анодом и катодом, создавая ещё большие неоднородности как в отдельной камере, так и в детекторе в целом. Поэтому уменьшение угла поворота α (например, до $\alpha = 2^\circ$, когда эффективная толщина $d_{эф}$ увеличивается почти в 30 раз), казалось бы, должно увеличить эффективность детектора Multi-Blade, уменьшить требуемую толщину конвертерного слоя и ослабить деформацию катода, однако для этого потребуется уменьшить толщину подложки, что невозможно вследствие увеличения деформаций утончённой подложки из-за упругих напряжений уменьшенного слоя конвертера. Кроме этого, при уменьшении угла поворота накладываются повышенные требования к точности геометрии на уровне долей угловых минут в каждой камере детектора.

Изменение расстояния анод-катод оказывает сильное влияние на скорость счёта. Однако уменьшение расстояния анод-катод и шага между проволочками с целью повышения загрузочной способности и улучшения временного и позиционного разрешения детектора Multi-Blade также невозможно реализовать в связи с резким повышением требований к стабильности расстояния анод-катод и анод-стрипы, так как напряжённость пропорциональна квадрату расстояния, а при уменьшении этого расстояния нелинейное изменение поля до максимального значения происходит на малом промежутке и незначительные отклонения от геометрии приводят к значительным изменениям газового усиления, что усиливает пространственные неоднородности.

Таким образом, конструкция детектора Multi-Blade определяет ограничения по величине дальнейшего повышения эффективности регистрации нейтронов, загрузочной способности, временного и позиционного разрешения.

Поставленная задача достигается изменением конструкции детектора за счёт того, что в качестве подложки катода используется тонкая радиационно-стойкая полимерная плёнка, с противоположных концов закреплённая на пластинах из радиационно-стойкого изоляционного материала, анодные проволочки закреплены на пластинах из аналогичного материала, причём заданная толщина пластин калибрована и в них выполнены два отверстия под стержни калиброванного диаметра, имеющие резьбовые отверстия, в которые вставлены винты, причём стержни размещены попарно друг напротив друга в прикреплённых к корпусу направляющих с возможностью перемещения в направлении по длине камер для регулировки натяжения катодов на подложке из полимерной плёнки и многопроволочных анодов с помощью вращения винтов, головки которых опираются снаружи на стенку корпуса детектора, на обе пары стержней нанизаны с поочередным размещением пластины с катодом на полимерной плёнке и пластины с анодными проволочками с установкой между пластинами проставок определённой калиброванной толщины так, что формируются одинаковые параллельно стоящие камеры.

В рамках гранта разработана конструкция нового позиционно-чувствительного детектора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[1.1.6.1] B. Guerard, R. Hall-Wilton, and F. Murtas, “Prospects in mpqds development for neutron detection,” arXiv:1410.0107, 2014.

[1.1.6.2] C. Höglund, “B⁴c thin films for neutron detection,” *Journal of Applied Physics*, vol. 111, no. 10, 2012.

[1.1.6.3] F. Piscitelli и др. «The Multi-Blade Boron-10-based Neutron Detector for high intensity Neutron Reflectometry at ESS» (*Journal of Instrumentation (JINST)* Volume 12, P03013, Published 15 March 2017; arXiv:1701.07623v1 [physics.ins-det] 26Jan 2017).

[1.1.6.4] A. Andronic, C. Garabatos, D. Gonzalez-Diaz, A. Kalweit, and F. Uhlig, “A comprehensive study of rate capability in multi-wire proportional chambers,” *Journal of Instrumentation*, vol. 4, no. 10, p. P10014, 2009).

1. Приложения.

2. 1. Конструкторская документация. Файл Прилож.1.1.6.pdf

1.1.7. Газовый позиционно-чувствительный детектор с резистивной нитью для применения на высоко-поточных импульсных источниках нейтронов. (1 очередь)

Значительное число экспериментов в ядерной физике и физике конденсированного состояния вещества требуют определения пространственного распределения нейтронных пучков либо определения координаты точки регистрации нейтронов. В зависимости от типа эксперимента к детекторам предъявляются различные требования, связанные с пространственным разрешением, перекрываемой площадью, быстродействием, эффективностью к нейтронам, чувствительностью к гамма-излучению и т. д. Важное значение имеет так же стоимость прибора и скорость его разработки. Для решения ряда научных и технических задач, связанных с нейтронным рассеиванием на современных высокопоточных источниках нейтронов, рассматривается возможность применения позиционно-чувствительных детекторов тепловых нейтронов на основе пропорциональных счетчиков нейтронов с резистивным анодом, кратко называемых позиционно-чувствительными счетчиками (ПЧС).

Принцип работы счетчика достаточно прост. По оси корпуса счетчика, одновременно служащего катодом, располагается тонкая анодная проволока с достаточно большим удельным сопротивлением. Корпус герметически запаян и наполнен газовой смесью, содержащей конвертер нейтронов, чаще всего ^3He . Сигнал снимается одновременно с обоих концов счетчика. В зависимости от места регистрации нейтронов будет изменяться сопротивление соответствующих участков анода. Таким образом, сигналы с концов трубки зависят от точки регистрации, и по их соотношению можно найти координату нейтрона по оси, параллельной аноду. Точность определения координаты составляет обычно 0,5% - 1% от длины анодной нити. Координата по оси, перпендикулярной аноду, определяется с точностью до диаметра счетчика.

Такие счетчики достаточно просты в производстве и надежны в эксплуатации. Простота конструкции позволяет производить их в промышленных масштабах. Детекторные системы из ПЧС широко применяются на экспериментальных установках в ведущих зарубежных нейтронных центрах, как на стационарных [1.1.7.1-1.1.7.2], так и на импульсных [1.1.7.3] источниках. Типичные параметры типового счетчика зарубежного производства: диаметр счетчика 6,4- 8,5 мм. ($1/4'$ - $1/3'$), длина счетчика 400 мм - 1000 мм), пространственное разрешение 0,5%-1% от длины счетчика. Обычно детекторные системы собираются из отдельных счетчиков, объединяемых в модули, так как модульная конструкция удобна при обслуживании, настройке и ремонте. Так, типичный модуль детектора тепловых нейтронов производства фирмы Рейтер-Стокс (Reuter-Stokes) состоит из 8 счетчиков. Применение модульной конструкции детектора позволяет сократить время сборки детекторной системы, ускорить и упростить ее ввод в эксплуатацию. Вместе с тем, ввод в эксплуатацию новых высокоинтенсивных исследовательских источников нейтронов вызывает

необходимость разработки новых детекторов и детекторных систем, так как существующие приборы не могут в полной степени реализовать весь потенциал таких источников. [1.1.7.4].

На момент начала настоящих работ отечественная промышленность не выпускала готовых модулей ПЧС тепловых нейтронов, а сами счетчики производятся единичными опытными партиями. Для создания новых и модернизации существующих систем детектирования тепловых нейтронов были сформулированы требования к типовому модулю газовой позиционно-чувствительной детекторной системы из позиционно-чувствительных счетчиков и подготовлена конструкторская документация на типовой модуль.

Типовой модуль детекторной системы на основе ПЧС тепловых нейтронов разрабатывается для применения в детекторных системах экспериментальных установок нейтронного рассеивания, используемых в ядерной физике и физике конденсированного состояния вещества. Детекторная система может состоять из одного или нескольких модулей, закрепленных на жесткой раме. Количество модулей определяется чувствительной площадью детекторной системы, в зависимости от решаемой физической задачи. Монтаж модулей осуществляется с передней стороны детектора. Позиционирование модулей на раме детекторной системы производится с помощью калиброванных шпильков и отверстий диаметром 2мм. Крепление модулей к раме осуществляется стандартными крепежными элементами Rexroth.

Модульная конструкция должна обеспечивать:

- Возможность работы в режиме времени-пролета на современных высокопоточных источниках нейтронов, в том числе и работающих в импульсном режиме.
- Быструю сборку и разборку детекторной системы.
- Возможность замены отдельного модуля
- Высокую технологичность и низкую стоимость конструкции.
- Модули должны иметь возможность вертикального и горизонтального размещения.

Предлагаются конструктивные решения для модуля детектора на основе газовых позиционно-чувствительных счетчиков с резистивной нитью.

В модуле предлагается применить модернизированные счетчики, аналогичные счетчикам производства «НПФ КОНСЕНСУС» марки ГЕЛИЙ-8/600-12,5/Л. Счетчик ГЕЛИЙ-8/600-12,5/Л разработанные для регистрации потоков медленных нейтронов в пропорциональном режиме. Диаметр катода счетчика 8 мм, длина катода 600мм, длина чувствительной области порядка 586 мм.

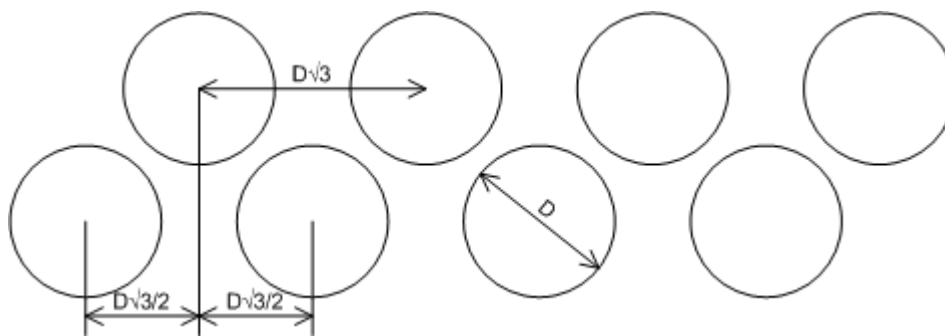


Рис. 1.1.7.1 Схема расположения счетчиков.

Модуль предлагается собирать из 8 позиционно-чувствительных счетчиков тепловых нейтронов, смонтированных на жестком основании. Счетчики располагаются в два слоя. Количество счетчиков четное. В каждом слое расстояние между счетчиками составляет 14 мм (примерно $\sqrt{3} D$, где D - диаметр счетчика). Счетчики во втором слое сдвинуты по горизонтали относительно первого на 7 мм ($\sqrt{3} D/2$), тем самым перекрывая зазор между счетчиками первого слоя. Такое расположение позволяет перекрыть чувствительную область детектора без существенной потери эффективности на краях счетчиков. Один модуль перекрывает чувствительную область $57 \times 586 \text{ мм}^2$. В качестве основания применен алюминиевый профиль Bosh Rexroth 45 или аналогичный. На основания крепятся счетчики, позиционирующие элементы (проставки) и корпуса предусилителей. Для крепления счетчика в корпусе предусилителя предусмотрен входной коллектор. Конструкция модуля легко масштабируется под другие размеры счетчиков. В случае необходимости на жесткое основание крепится защита от перерассеянных и фоновых нейтронов из борированной резины толщиной 5 мм или кадмия толщиной 1 мм.

Работа на высокопоточных импульсных источниках нейтронов требует повышения максимальной загрузки детекторов, так же, как и общей скорости счета детекторной системы. Решение данной задачи состоит в увеличении быстродействия отдельных счетчиков путем подбора соответствующих параметров газовой смеси вместе с применением многослойного расположения счетчиков. При многослойном расположении возможно применение счетчиков с меньшей эффективностью, не приводящее к существенному уменьшению эффективности детекторной системы в целом, но снижающая загрузку отдельного счетчика. Тем самым уменьшаются требования к быстродействию регистрирующей электроники и к «мертвому времени» счетчика. При этом количество самого дорогостоящего компонента счетчиков - газа конвертера нейтронов ^3He в детекторной системе не увеличивается, и увеличение быстродействия системы получается за счет увеличения количества регистрирующих каналов.

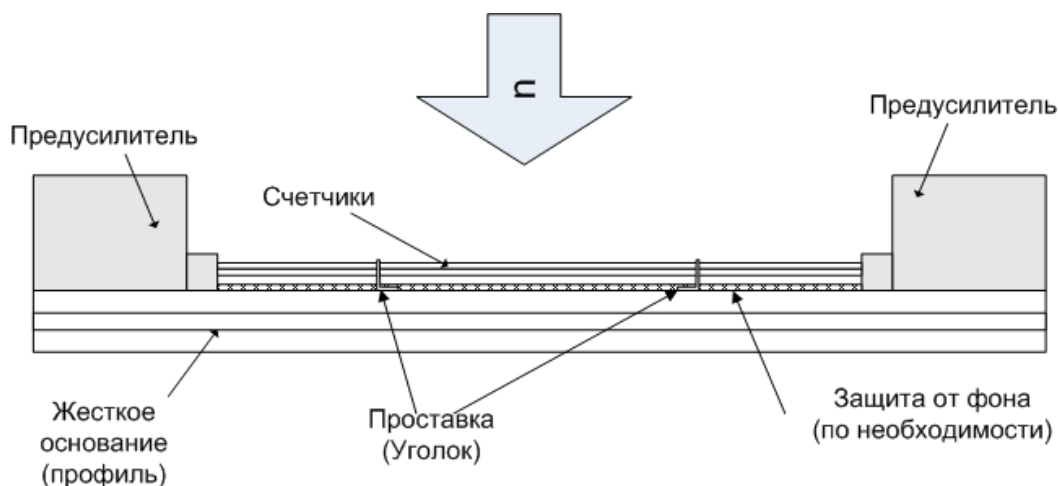


Рис. 1.1.7.2 Схема расположения элементов модуля.

Для передачи сигнала со счетчиков применены зарядочувствительные предусилители разработки ЛНФ ОИЯИ. На одной плате монтируются 4 усилительных канала, в корпусе предусилителя располагаются 2 платы. Так как сигнал снимается с обоих концов счетчика, для одного модуля требуется 8 усилительных каналов. Для задач, не требующих высокого быстродействия и координатного разрешения, количество усилительных каналов может быть уменьшено в два раза путём попарного последовательного соединения счетчиков.

Регистрирующие электронные блоки, за исключением предусилителей, предлагается вынести от нейтронного пучка на расстояние до 15 м. Тем самым снизится радиационная нагрузка на оборудование, повысится их надежность и срок службы. Для детекторов предполагается использовать блоки в стандарте NIM общего назначения, с возможностью разработки специализированных электронных блоков работы с детекторами. Для подачи высокого напряжения предлагается применить блоки CAEN N1470 [1.1.7.5], оцифровку сигналов предлагается осуществлять с помощью блоков многоканальных оцифровщиков формы сигнала CAEN 6730 [1.1.7.6].

Разработана конструкторская документация в составе сборочного чертежа и чертежей деталей для детекторного модуля первой очереди. Разработана конструкторская документация в составе сборочного чертежа и чертежей деталей для варианта детекторной системы, включающей в себя три модуля. При этом перекрываемая чувствительная площадь составляет 169 x 586 мм².

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1.1.7.1] G. J. Cuello et al 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 746 012020
- [1.1.7.2] S. Mühlbauer et al 2016 NIMA 832, 297–305
- [1.1.7.3] K. D. Berry et al 2012 NIMA 693, 179-185
- [1.1.7.4] K. Kanaki et al 2018 JINST 13 P07016

[1.1.7.5] <https://www.caen.it/products/n1470/>

[1.1.7.6] <https://www.caen.it/products/n6730/>

Приложения:

1. Конструкторская документация. Прилож.1.1.7.pdf

1.1.8 Теоретические и экспериментальные исследования по определению оптимальной конструкции регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером (совместно с НИЦ КИ ПИЯФ. Договор 400/1995 от 25.11.2021).

1. Общие положения

Наилучшим конвертером для регистрации тепловых и холодных нейтронов считается изотоп гелия ^3He . Однако в связи с резким сокращением производства изотопа ^3He в последнее десятилетие (с 2000 г.), вызвавшем увеличение его стоимости более чем на порядок, ведется активный поиск альтернативного ему конвертера. Отметим также другой недостаток: в ряде задач, таких, как нейтронная время-пролетная эхо-спектрометрия, где требуется высокое временное разрешение порядка 10-100 ns детектор, выполненный на газовом конвертере, просто не годится, его временное разрешение $\sim 1 \mu\text{s}$ и хуже. Детекторы, выполненные на твердотельных тонкопленочных конвертерах ^{10}B и $^{10}\text{B}_4\text{C}$, обладают указанным временным разрешением 10-100 ns.

Полезно напомнить, что тепловой нейтрон обладает энергией $E_T = kT = 25.2 \text{ meV}$ (k – постоянная Больцмана, $8,61 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$, $T = 293\text{K}$ – комнатная температура по Кельвину), имеет длину волны $\lambda_0 = 9.04/\sqrt{E_T} = 1.8 \text{ \AA}$ и движется со скоростью $v_0 = 0.43\sqrt{E_T} = 2.163 \text{ km/s}$ ($\text{mm}/\mu\text{s}$), где E_T (meV).

Нейтроны с большей длиной волны (медленные) называют холодными (Таблица 1.1.8.1), например, нейтроны с длиной волны $\lambda = 10 \text{ \AA}$ имеют энергию $\sim 0.8 \text{ meV}$ и скорость $\sim 0.4 \text{ mm}/\mu\text{s}$ в соответствии с $E = 81.787/\lambda^2 = 5.2276 \cdot 10^{-6} v^2$, где размерности E (meV), λ (\AA), v (m/s).

Существует сравнительно небольшое количество конвертеров нейтронов в заряженные частицы, которые можно зарегистрировать [1.1.8.1]. Наряду с конвертером встречается и другой термин – *радиатор*. В основе конверсии лежит реакция нейтронного захвата, идущая с относительно большим сечением: $(A, z) + n \rightarrow (A+1, z)^*$, когда ядро атома-конвертера с атомной массой A и зарядом z соединяется с нейтроном n и образует более тяжелое возбужденное ядро $A+1$, распадающееся на заряженные фрагменты с выделением значительной энергии.

Таблица 1.1.8.1. Общепринятая классификация нейтронов по энергиям.

Energy classification	kinetic energy E (eV)	wavelength (\AA)	velocity (m/s)
ultra cold (UCN)	$E < 3 \cdot 10^{-7}$	$\lambda > 520$	$v < 7.5$
very cold (VCN)	$3 \cdot 10^{-7} < E < 5 \cdot 10^{-5}$	$520 > \lambda > 40$	$7.5 < v < 99$
cold	$5 \cdot 10^{-5} < E < 0.005$	$40 > \lambda > 4$	$99 < v < 990$
thermal	$0.005 < E < 0.5$	$4 > \lambda > 0.4$	$990 < v < 9900$
epithermal	$0.5 < E < 10^3$	$0.4 > \lambda > 0.01$	$9900 < v < 4.4 \cdot 10^5$
intermediate	$10^3 < E < 10^5$	$0.01 > \lambda > 0.001$	$4.4 \cdot 10^5 < v < 4.4 \cdot 10^6$
fast	$10^5 < E < 10^{10}$	$0.001 > \lambda > 3 \cdot 10^{-6}$	$4.4 \cdot 10^6 < v < 1.3 \cdot 10^9$

Можно утверждать, что изотоп бора ^{10}B в твердотельном тонкопленочном варианте карбида бора¹ [2, 3] стал конвертором, который во многом не уступает ^3He , а в ряде характеристик и превосходит последний. Например, он позволяет получить высокое временное разрешение.

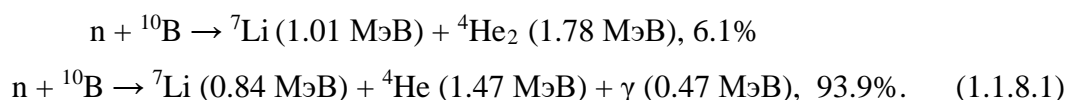
Природный бор, содержащий изотоп ^{11}B , широко распространен и существует высокопроизводительная технология обогащения его изотопом ^{10}B до концентраций 90-99%.

Успешно применяется в качестве твердотельного конвертора также изотоп лития ^6Li . Он чаще вводится в сцинтилляторы, например^{2,3}, $\text{ZnS}(\text{Ag})/^6\text{LiF}$ и в настоящем обзоре опущен.

Реже применяются другие конверторы, например, тонкопленочный гадолиний $^{157}\text{Gd}_6$, который характеризуется рекордно большим сечением захвата тепловых нейтронов (255000 barn). При захвате нейтрона ядром гадолиния испускаются конверсионные электроны относительно низких энергий 100-200 keV, что является недостатком, т. к. порог режекции постороннего гамма-фона устанавливается на уровне 100 keV, т.е. под порогом окажется и полезный сигнал. Этот конвертор также в настоящем обзоре не рассматривается.

Общий прогресс в развитии детекторов ионизирующих излучений, особенно связанный с созданием Большого адронного коллайдера, не мог не коснуться детекторов т.х.н. В последние годы в экспериментальной физике высоких энергий появился и бурно развивается новый класс детекторов, названных микроструктурными: MPGD – Micro-Pattern Gaseous Detectors⁴. Как показано ниже, эти детекторы начинают успешно применяться для регистрации т.х.н., на что обращено особое внимание в настоящем обзоре.

Детектирование т.х.н. производится путем радиационного захвата нейтрона ядром изотопа бора ^{10}B с последующим развалом возбужденного ядра на два фрагмента (в скобках указана вероятность, с которой идет реакция):



Заряженные фрагменты – ядра ^7Li и ^4He – альфа-частица (α) с суммарным энерговыделением 2.79 MeV выходят либо один, либо другой из пленки в газ с потерями энергии внутри пленки, часть энергии 0.47 MeV уносит гамма-квант. Эффективность регистрации сигнала определяет сечение

¹ Höglund C. // Radiation Physics and Chemistry 113 (2015) P.14. As shown $^{10}\text{B}_4\text{C}$ films are not damaged by radiation during many years in neutron detection.

² Лутвин В. и др.

<http://rnsiks2014.pnpi.spb.ru/uploads/attachment/88/%D0%9B%D0%B8%D1%82%D0%B2%D0%B8%D0%BD.pdf>

³ Stoykov A. et al. arXiv:1408/6119v1, 2014. Сообщается о достигнутой чувствительности к гамма-фону 10^{-6} (^{60}Co) при эффективности регистрации тепловых нейтронов 65%.

⁴ Croci G.

<https://indico.cern.ch/event/757322/contributions/3325227/attachments/1841391/3019217/Croci-MPGD2019.pdf>

реакции (1.1.8.1), которое зависит от длины волны нейтрона, и для теплового нейтрона равняется $\sigma(\lambda_0)=3836 \text{ barn}$. Это сечение – достаточно большое, всего на 28% меньше, чем сечение регистрации сигнала гелием ^3He .

Газ $^{10}\text{BF}_3$, обогащенный изотопом ^{10}B , применяющийся в качестве конвертора еще с 30-х годов, является *ядовитым* и по этой причине опасным. Отметим, что газ $^{10}\text{BF}_3$ с обогащением до концентрации 96% изотопом ^{10}B , применяется и сегодня⁵, как альтернатива ^3He , в мониторах, выполненных на трубках при атмосферном давлении. Можно встретить и проволочные камеры MWPC, наполненные $^{10}\text{BF}_3$. Недостатком такого газа в сравнении с гелием является бóльшая длина пробега в газе энергичных фрагментов, и при таких пробегах трудно локализовать точку захвата нейтрона, нужно создавать еще бóльшее давление чем в гелии, что усложняет конструкцию корпуса. Работы на эту тему в обзоре опущены.

В университете в Lund (Швеция) совместно с ESS (European Spallation Source) разработана технология напыления качественных пленок карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, обогащенного изотопом ^{10}B [1.1.8.2]. Основная задача созданного подразделения – напыление 6000 m^2 пленок для детекторов ESS. В качестве подложки, как правило, используется листовая алюминий толщиной 0.5 mm. Стоимость напыления тонкопленочных конверторов из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ составляет для ESS 1000 евро за 1 кв. м. Отсюда, при одинаковых эффективности и апертуре, стоимость детектора на ^{10}B получается на порядок меньше чем на ^3He .

На рис.1.1.8.1 приведены сечения реакции (1.1.8.1) для ^{10}B и природного ^{11}B . Как видно, у второго в интересующей нас области т.х.н. сечение на шесть порядков меньше.

Заряженные продукты реакции (1.1.8.1) вылетают из точки захвата нейтрона в противоположные стороны изотропно, как показано на рис. 1.1.8.2. В отличие от гелия, здесь часть энергии фрагментов *всегда* теряется в толще пленки. Продукты реакции (1.1.8.1) – энергичные, сильноионизирующие газ частицы, образующие при полной остановке в аргоне⁶ не менее 50000 электрон-ионных пар (заряд 8 fC). Такой сигнал можно зарегистрировать электроникой без дополнительного усиления. Однако нужно учитывать поглощение энергии в веществе пленки, что уменьшает количество электронов в газе. Кроме того, большие пробеги в газе энергичных фрагментов с различной ориентацией вызывают значительные флуктуации амплитуды импульсов, поэтому необходимо усиление первичного заряда в 10-100 раз.

⁵ С. Czajkowski et al. Construction and Development of a BF_3 Neutron Detector at Brookhaven National Laboratory (BNL) // <https://www.bnl.gov/isd/documents/77530.pdf>

⁶ С тонкопленочным конвертором ^{10}B применяется газовая смесь на основе аргона при атмосферном давлении на продув, что существенно упрощает конструкцию корпуса.

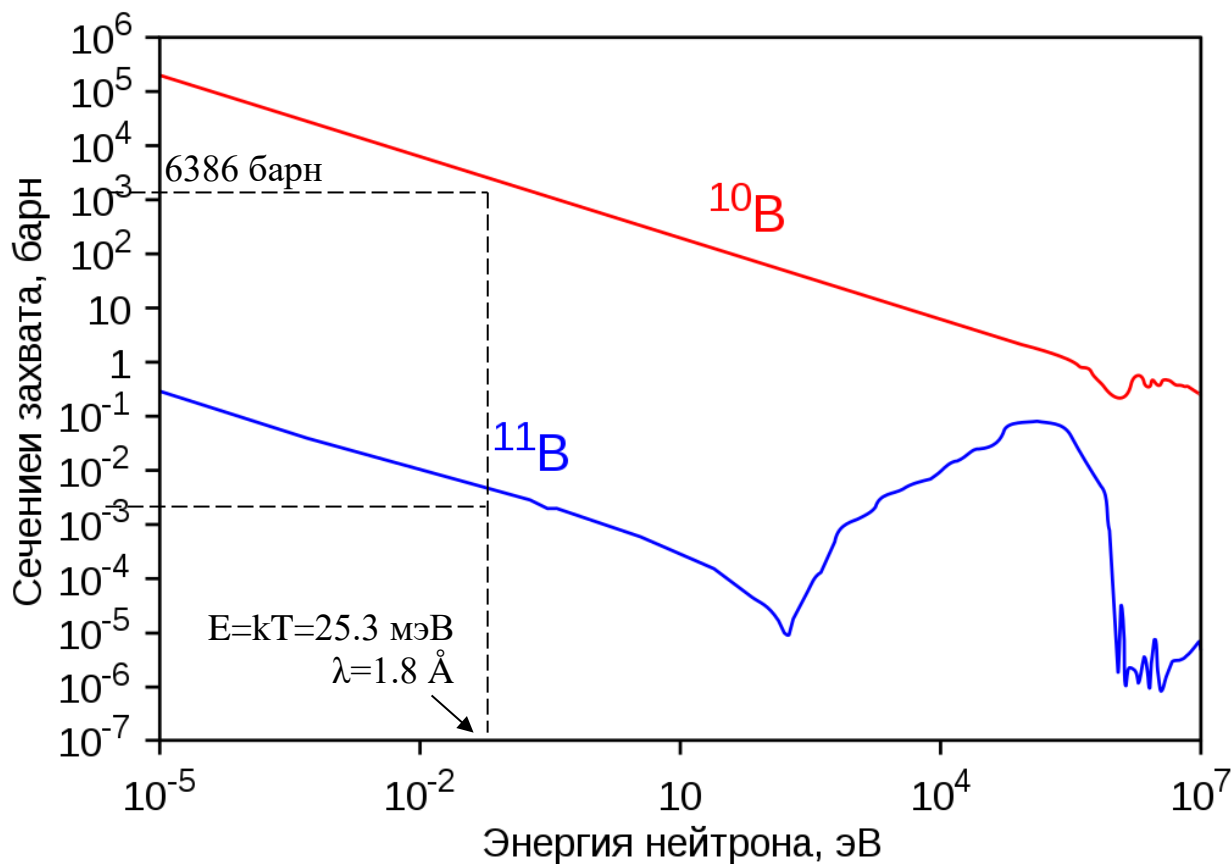


Рис. 1.1.8.1. Сечения реакции захвата нейтрона ядрами изотопов бора ^{10}B и природного ^{11}B отличаются на 6 порядков.

Подчеркнем, что для более точной локализации в пространстве нейтрона, например, меньше 1 мм необходимо ограничивать пробеги (так, пробег альфа-частицы с энергией 1 МэВ в алюминиевой фольге составляет $\sim 10\ \mu\text{m}$), по этой причине потребуются также усиливать первичный заряд.

Пробег альфа-частицы с энергией 1 МэВ в аргоне составляет приблизительно 1 см, в результате ионизации атомов газа вдоль трека образуется 40000 пар электрон-ион ($\sim 6\ \text{fC}$). Если ограничить пробег до 100 μm , то потребует усиления заряда ~ 1000 раз.

Для эффективной регистрации т.х.н. необходимо создать определенную концентрацию ядер ^{10}B на пути нейтрона, для чего слой конвертора должен быть достаточно толстым. Однако, длина пробега зависит от ядра и его энергии, а также от плотности вещества и хорошо известна: 3.27 (4.05) μm для ядер гелия ^4He с энергией 1.47 (1.78) МэВ и 1.69 (1.90) μm для ядер лития ^7Li с энергией 0.84 (1.01) МэВ. Видно, что толщина конверторного слоя должна быть порядка 1-3 μm , иначе будет мала вероятность выхода из пленки, см. рис. 1.1.8.3. При такой толщине конвертора эффективность регистрации нейтрона не больше 5%, что является недостатком. Для увеличения эффективности необходимо набирать нужное число *тонких* слоев.

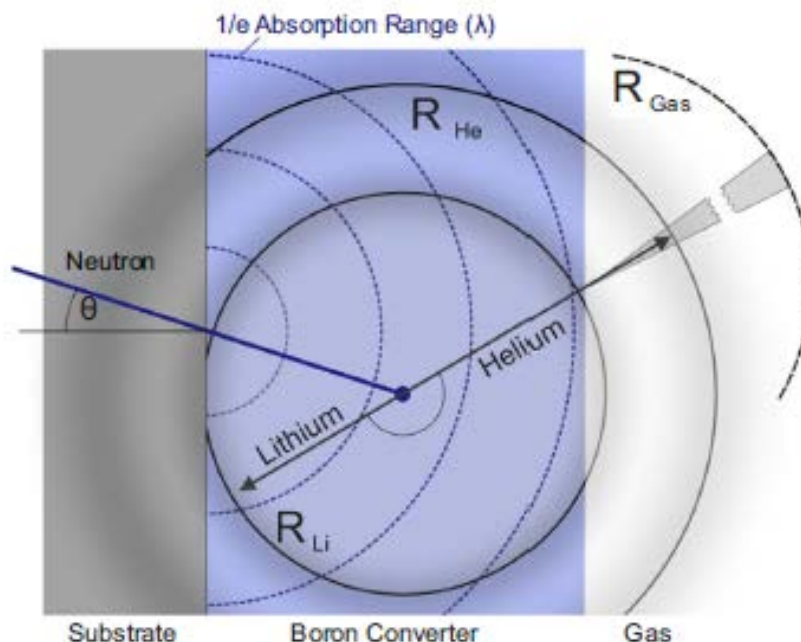


Рис. 1.1.8.2. Продукты реакции захвата нейтрона ядром ^{10}B внутри пленки вылетают в противоположные стороны изотропно так, что либо ядро лития, либо альфа-частица попадает в газ рабочего зазора детектора, где регистрируется, как заряженная частица.

Эффективность тонкопленочного детектора нельзя выразить простой формулой, как в случае газового конвертора, т.к. наряду с вероятностью захвата нейтрона необходимо учитывать вероятность выхода фрагментов из пленки в газ. Поэтому воспользуемся приведенными на рис. 1.1.8.4 зависимостями эффективности регистрации нейтрона от числа слоев пленки и от ее толщины для длин волн $\lambda=1.8\text{\AA}$ и $\lambda=10\text{\AA}$, заимствованными из работы [1.1.8.3, 1.1.8.4]. Из рисунка видно, что для получения эффективности 60-70% необходима суммарная толщина пленки 30-40 μm .

Таблица 1.1.8.2. Длина пробега фрагментов реакции захвата нейтрона ядрами конверторов ^{10}B и ^6Li в чистых материалах и в соединениях.

material	$R(\mu\text{m})$ $\alpha(2050\text{ KeV})$	$R(\mu\text{m})$ $^3\text{H}(2740\text{ KeV})$		
pure ^6Li	21	132		
96% enriched ^6LiF	5.2	32.8		
	$R(\mu\text{m})$ $\alpha(1470\text{ KeV})$	$R(\mu\text{m})$ $^7\text{Li}(830\text{ KeV})$	$R(\mu\text{m})$ $\alpha(1770\text{ KeV})$	$R(\mu\text{m})$ $^7\text{Li}(1010\text{ KeV})$
pure ^{10}B	3.3	1.5	4.1	1.8
98% enriched $^{10}\text{B}_4\text{C}$	2.9	1.2	3.7	1.5

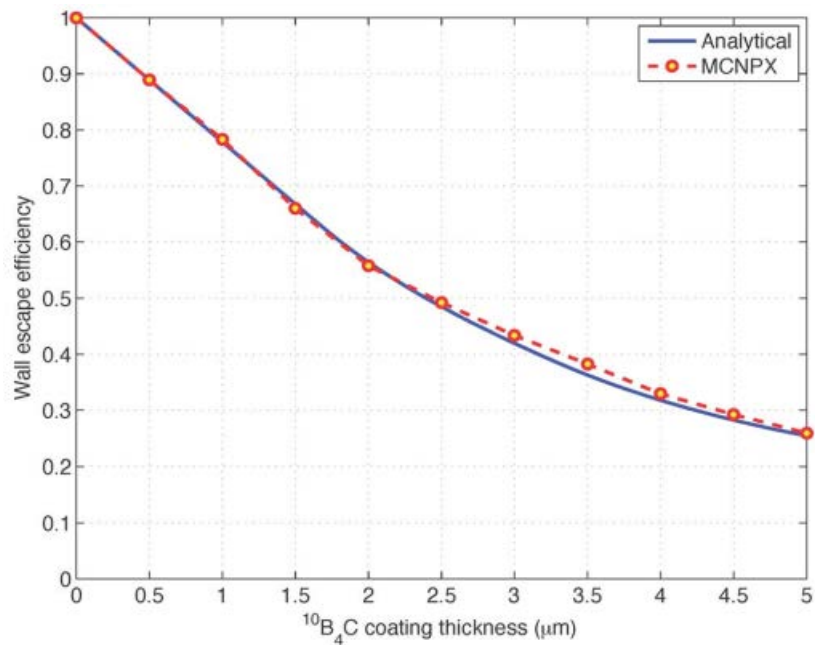


Рис. 1.1.8.3. Вероятность ϵ_{esc} выхода фрагментов реакции (1.1.8.1) из пленки $^{10}\text{B}_4\text{C}$ как функция толщины пленки.

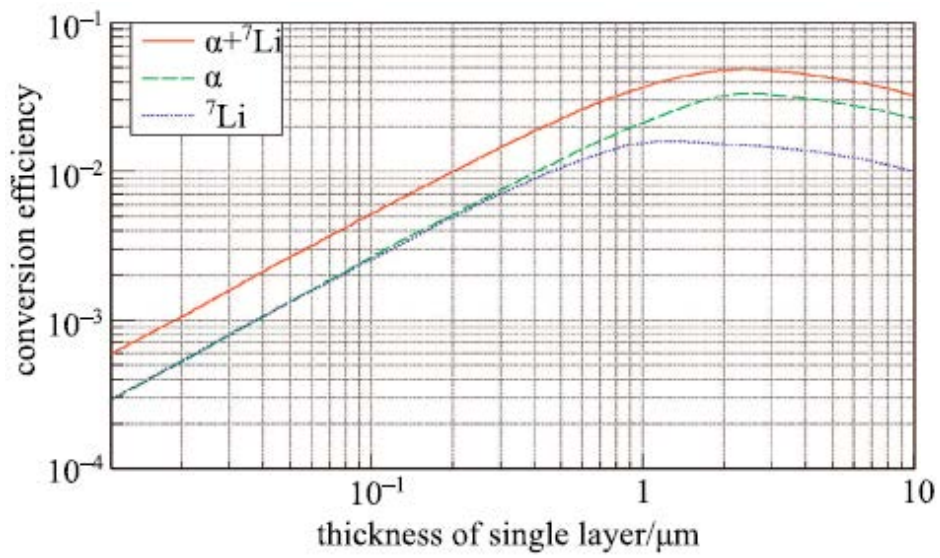
Вероятность выхода фрагментов реакции (1.1.8.1) из пленки заданной толщины дает программа SRIM. Она специально разработана для решения этой задачи.

Комплекс программ SRIM + Geant4 + Garfield позволяет полностью моделировать характеристики детекторов т.х.н. не только с газовым, но и с твердотельным конвертором ^{10}B [1.1.8.5].

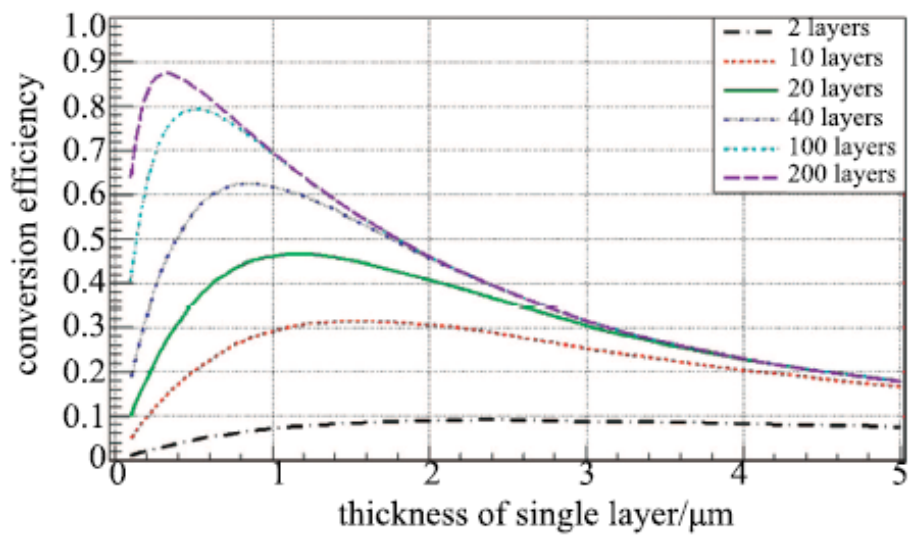
Из практики работы с газовым конвертором ^3He порог дискриминации гамма-фона принято устанавливать на уровне 100 keV. Как будет показано ниже (рис. 1.1.8.6), при таком пороге чувствительность к гамма-фону с конвертором ^{10}B не хуже 10^{-7} , а эффективность регистрации нейтрона может быть получена достаточно высокой.

Для определения эффективности регистрации т.х.н. необходимо знать вероятность выхода фрагментов из пленки в газ. Расчет, выполненный для трубки по программе SRIM, приведен на рис. 1.1.8.3 [1.1.8.6].

a



b



c

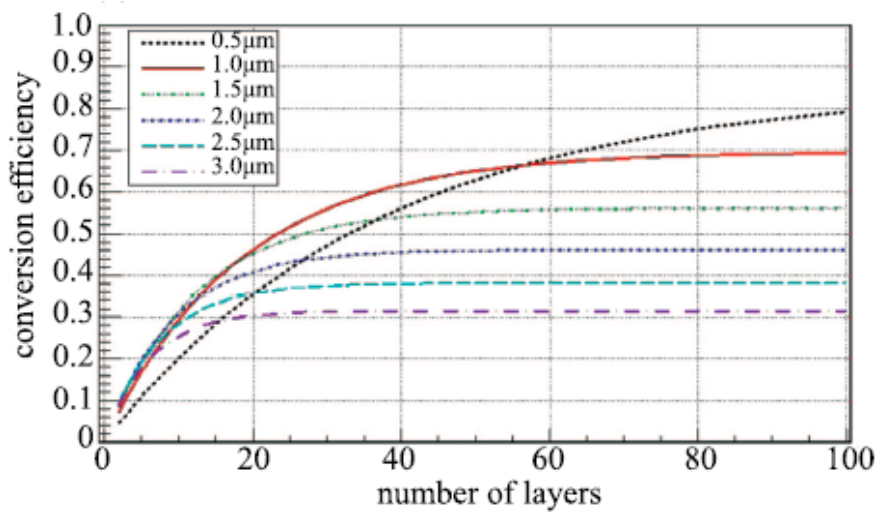


Рис. 1.1.8.4. Зависимости конверсионной эффективности от толщины слоя ${}^{10}\text{B}$ (a); зависимости эффективности регистрации нейтрона от толщины конвертора для тепловых нейтронов $\lambda=1.8 \text{ \AA}$

для разных толщин пленки (*b*) и зависимости эффективности регистрации нейтрона от числа слоев для разных толщин (*c*).

Зная это, можно оценить эффективность регистрации т.х.н. по формуле:

$$\epsilon = \epsilon_{esc} \cdot \{1 - \exp[-(N_A \cdot \rho/A) \cdot \sigma(\lambda) \cdot n \cdot t_{эф} \cdot \lambda/\lambda_0]\}, \quad (1.1.8.2)$$

где ϵ_{esc} – берется из рис. 1.1.8.3, $(N_A \cdot \rho/A) \cdot \sigma(\lambda_0) = 422$ – произведение концентрации ядер изотопа бора $N_A \cdot \rho/A = 1.1 \cdot 10^{23}$ в см^3 и сечения реакции (1.1.8.1) $\sigma(\lambda) = \sigma(\lambda_0) \cdot \lambda/\lambda_0$ принимая $\sigma(\lambda_0) = 3836$ barn; $n \cdot t_{эф}$ – суммарная толщина конвертора с учетом эффективной толщины пленки конвертора $t_{эф}$ [см].

Обзор и оценка твердотельных тонкопленочных детекторов т.х.н. на основе изотопа ^{10}B

Однокоординатные детекторы на газоразрядных пропорциональных счетчиках – строу-трубках

Отметим широкое распространение для регистрации т.х.н. ПЧД (англ. PSD – Position Sensitive Detector), выполненных на тонкостенных строу-трубках⁷ с напылением на катод карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, обогащенного изотопом ^{10}B . Это обусловлено тем, что газовая смесь на основе дешевого аргона находится при атмосферном давлении и может использоваться на продув. Диаметр трубочек может быть 2-5 мм при длине 1 и более метров, что улучшает пространственное разрешение поперек трубок.

Карбид бора, в отличие от чистого ^{10}B (см. Таблицу 1.1.8.3), обладает электропроводностью, и можно не опасаться пробоев от нежелательного накопления зарядов на поверхности катода.

В работе [1.1.8.6] и других работах этих авторов предложены интересные решения с профилями строу-трубок диаметром 4.5 мм в форме «звездочек», исключая мертвые зоны между трубками в блоке, рис. 1.1.8.5.

⁷ Строу-трубки (straw, русск. “солома”) – это тонкостенные трубки малого диаметра, которые стали возможными для регистрации т.х.н. благодаря тому, что используется простая газовая смесь, например, ArCO_2 при атмосферном давлении (на продув).

31× boron-coated straws,
4.43 mm diameter each

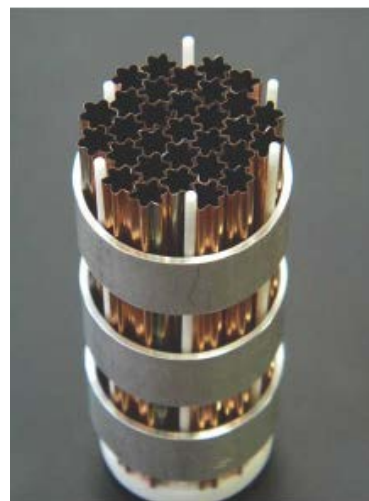
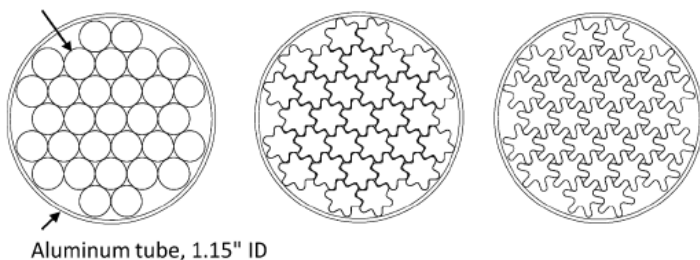


Рис. 1.1.8.5. Блоки из строу-трубок различных профилей (а), в том числе в форме “звездочек”, что исключает мертвые зоны между трубками, присущие круглым трубкам.

Предположим, что $t_{эф}$ – эффективная толщина конвертора в круглой строу-трубке, тогда в трубках с формой “звездочек” толщина увеличивается до $1.3 \cdot t_{эф}$ в одном варианте и $1.98 \cdot t_{эф}$ во втором, на фотографии справа показан реальный блок-модуль. Из блоков можно собирать детекторы т.х.н. с чувствительной апертурой 1 m^2 , кольцевые дифрактометры с изгибом детектирующей поверхности, который уменьшает параллакс в горизонтальной плоскости.

Чем больше таких трубок на пути нейтрона, тем выше и однороднее эффективность PSD по площади детектора, рис. 1.1.8.6.

В работе [1.1.8.6] отмечается исключительно высокая надежность трубок приведенной конструкции. Ускоренные тесты герметично заклеенных трубок с тонкопленочным покрытием катодов карбидом бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, выполненные при экстремальных температурах -70°C и $+125^\circ\text{C}$, показали время жизни детектора 30 лет (на доверительном интервале 99%). Из амплитудных спектров, приведенных на рис. 1.1.8.6 для т.х.н. (а) и гамма-фона (b), получена чувствительность к гамма-фону 10^{-8} при пороге 73 keV.

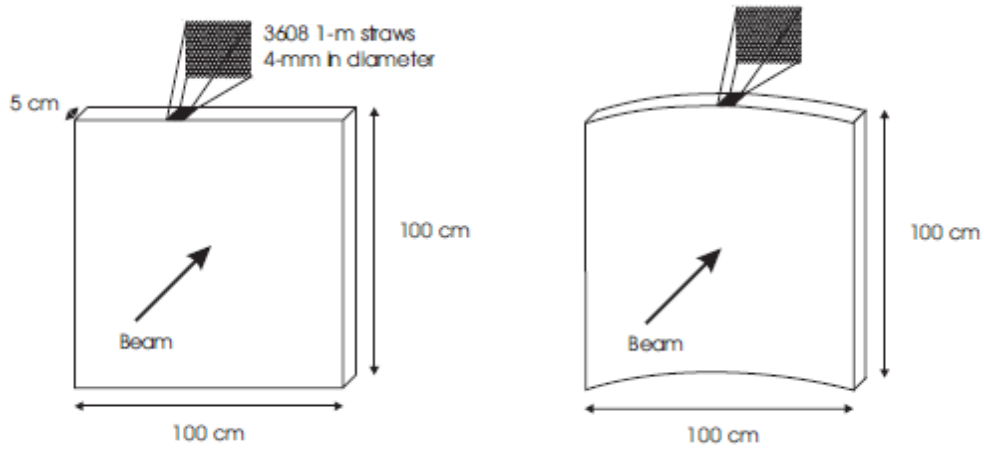
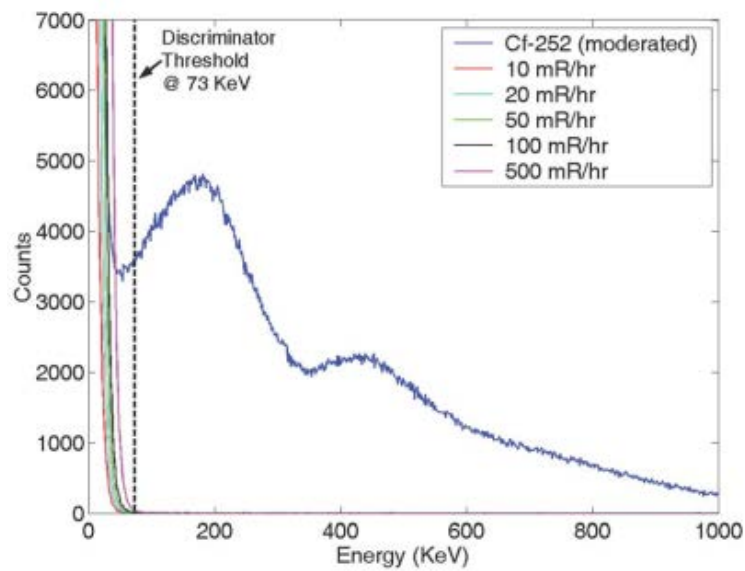


Рис. 1.1.8.6. Детекторы т.х.н. (b) с рабочей областью $100 \times 100 \text{ cm}^2$, собранные из блоков, с нанесенным на внутренние поверхности каждой трубки тонкопленочным конвертором $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

a



b

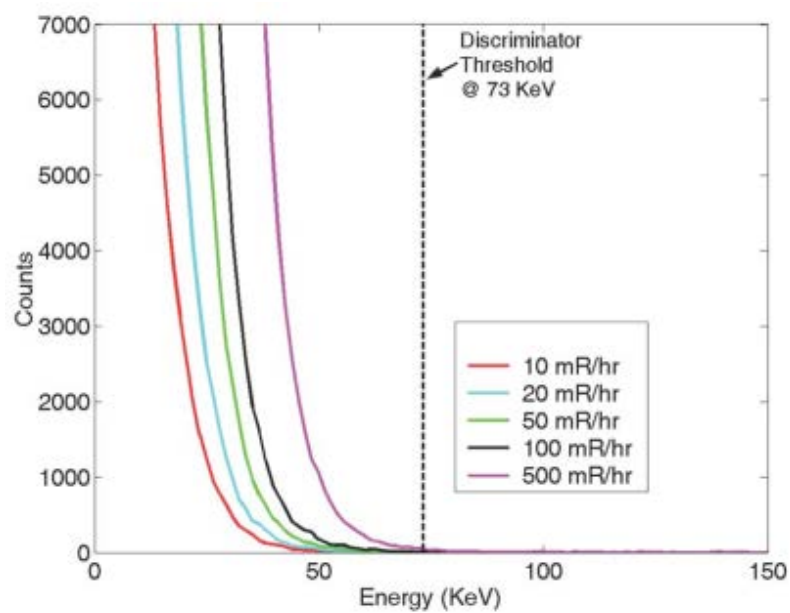


Рис. 1.1.8.7. Амплитудные спектры для т.х.н. (а) и гамма-фона (b), откуда получена чувствительность к гамма-фону для одной трубки при пороге 73 keV, составляющая 10^{-8} .

Поскольку при регистрации нейтрона срабатывает только одна трубка, то концы одноименных трубок в блоке объединяют вместе на входе усилителя, как показано на рис. 1.1.8.8 [1.1.8.7].

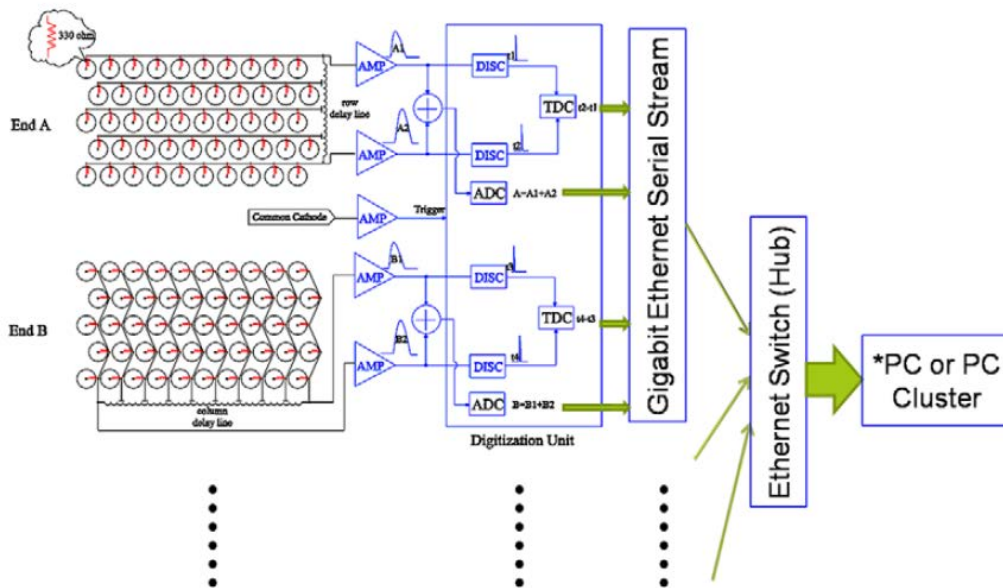


Рис. 1.1.8.8. Схема подключения блоков нейтронных строу-трубок к электронике [1.1.8.7].

Детектор Multi-Grid

На рис. 1.1.8.9 представлен детектор Multi-Grid, созданный совместно ILL и ESS для время-пролетного дифрактометра [1.1.8.8-1.1.8.10] (длина волны нейтрона измеряется по времени пролета).

В конечном варианте конструкции нейтрон пересекает 28 конверторных слоев с числом алюминиевых пластинок толщиной 0.5 mm $N_b=14$, на которые пленочный конвертор из карбида бора $^{10}\text{B}_5\text{C}_4$, обогащенный до 80% изотопом $^{10}\text{B}_5$, нанесен с двух сторон. Это обеспечивает достаточно высокую эффективность регистрации нейтронов с $\lambda=4-6 \text{ \AA}$.

В центре каждой ячейки размещена проволочка-анод для умножения первичного заряда, как в пропорциональном счетчике.

Катодом такой “трубки” являются проводящие стенки ячеек. Карбид бора хороший проводник с удельным электрическим сопротивлением $R \sim 10^{-3} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$.

Одна координата нейтрона определяется по номеру сработавшей ячейки, а вторая – делением заряда вдоль общей для всех ячеек анодной проволочки. Свойства такого PSD подобны LPSD с диаметром трубки 2 см.

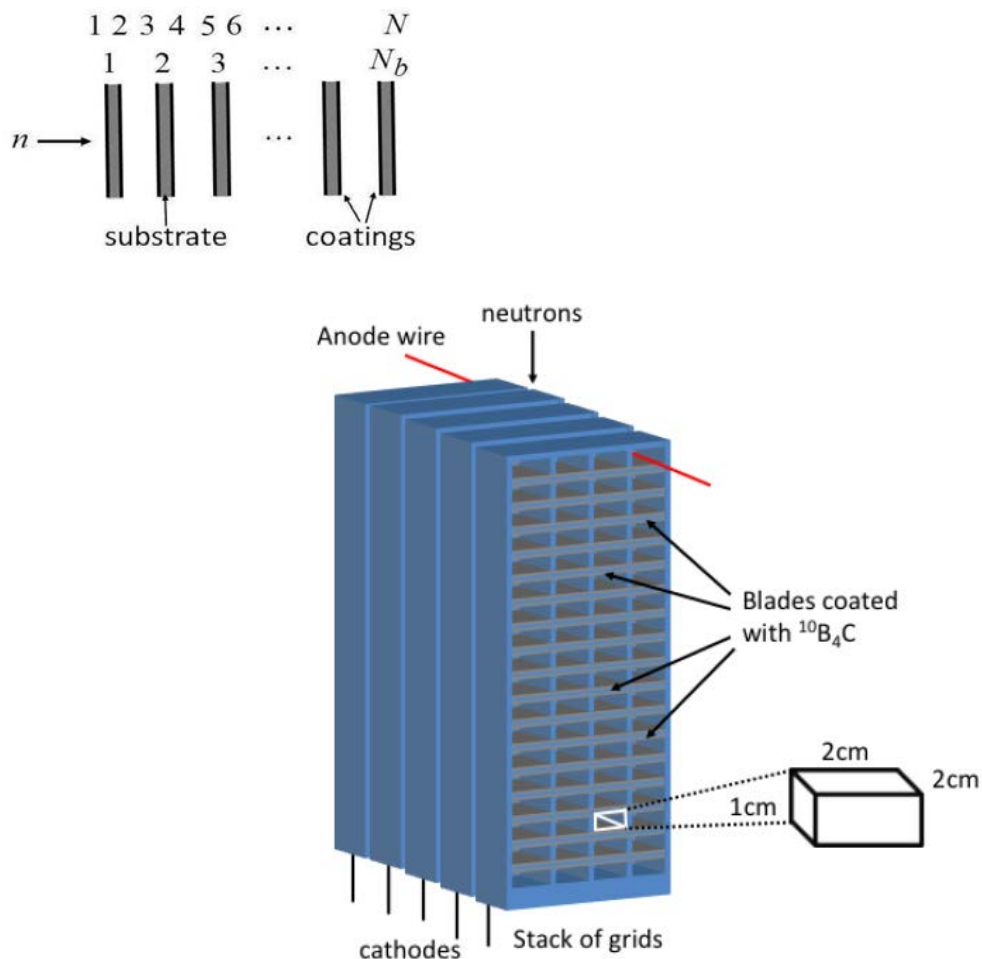


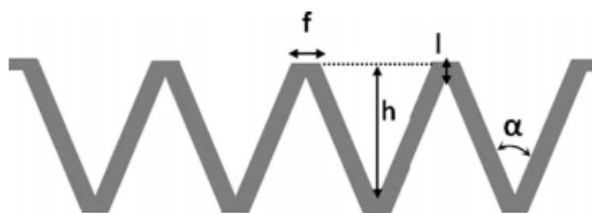
Рис. 1.1.8.9. Модуль Multi-Grid из многих элементарных ячеек.

Двухкоординатные детекторы на проволочных пропорциональных камерах MWPC

Другой метод, широко используемый для повышения эффективности регистрации т.х.н. тонкопленочным конвертором, основывается на малом угле α входа нейтрона в пленку конвертора, как показано на рис. 1.1.8.10 [1.1.8.11].

Метод позволяет увеличить эффективную толщину одной пленки, например, $d_{\text{эф}} = 11.5 \mu\text{м}$ при физической толщине $d = 1 \mu\text{м}$ и угле $\alpha = 5^\circ$, благодаря соотношению: $d_{\text{эф}} = d/\sin\alpha$, где $\sin\alpha \approx \alpha$.

a



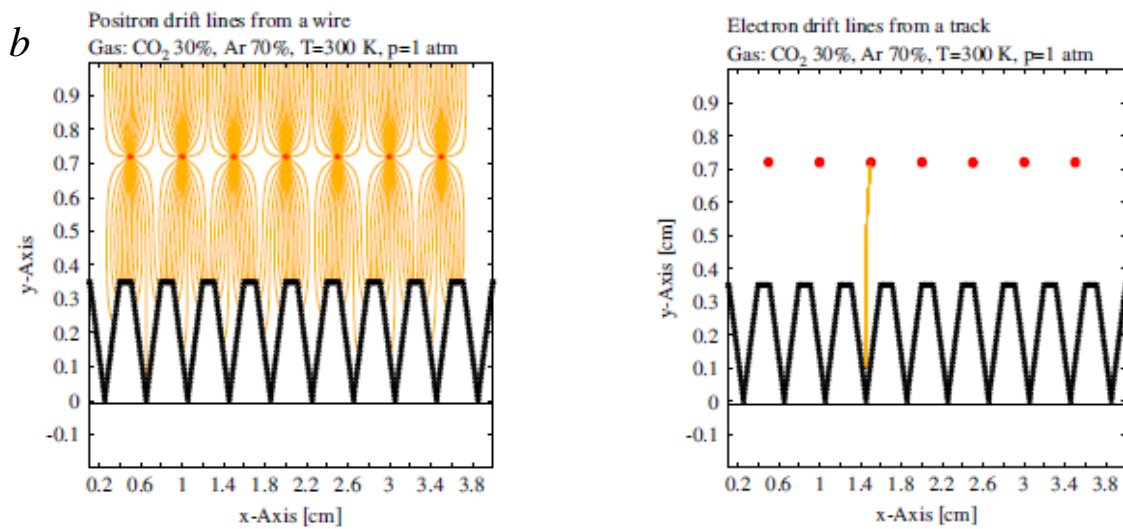


Рис. 1.1.8.10. Многопроволочная пропорциональная камера MWPC, одним из катодов которой является структурированная подложка с тонким слоем конвертора из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

В работах [1.1.8.11, 1.1.8.12] представлены результаты измерений, в которых пленка с конвертором из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной 3 μm нанесена на V-образную поверхность алюминиевой подложки, выполненной штамповкой. Такая поверхность названа «макроструктурной» с углом при вершине $2\alpha=45^\circ$. Структурированная поверхность является одним из катодов MWPC, рис. 1.1.8.8. В работе [1.1.8.12] изучалось влияние высоты структурированной подложки h и толщины пленки конвертора на характеристики детектора, при изменении h в широких пределах от 0.25 до 5 mm.

Высота структуры h влияет на длину пути дрейфа первичных электронов от точки захвата нейтрона ядром бора до анодной проволочки, что в конечном счете определяет временное разрешение камеры. Для дифрактометров ESS это исключительно важно, т. к. по времени пролета производится отбор нейтронов с необходимой длиной волны. Показано, что выигрыш в эффективности по сравнению с плоской (неструктурированной) подложкой составляет 40%. В качестве рабочего газа в работе применялась двухкомпонентная смесь $\text{Ar}/\text{CO}_2(70\%/30\%)$ при атмосферном давлении на продув.

Для того, чтобы с углом при вершине $2\alpha=45^\circ$ получить эффективную толщину конвертора 40 μm детектор должен содержать не менее пяти MWPC в одном газовом объеме.

На рис. 1.1.8.11 приведена схема сдвоенной камеры с общим твердотельным конвертором $^{10}\text{B}_4\text{C}$, напыленным с двух сторон на дрейфовый электрод структурированной формы [1.1.8.13].

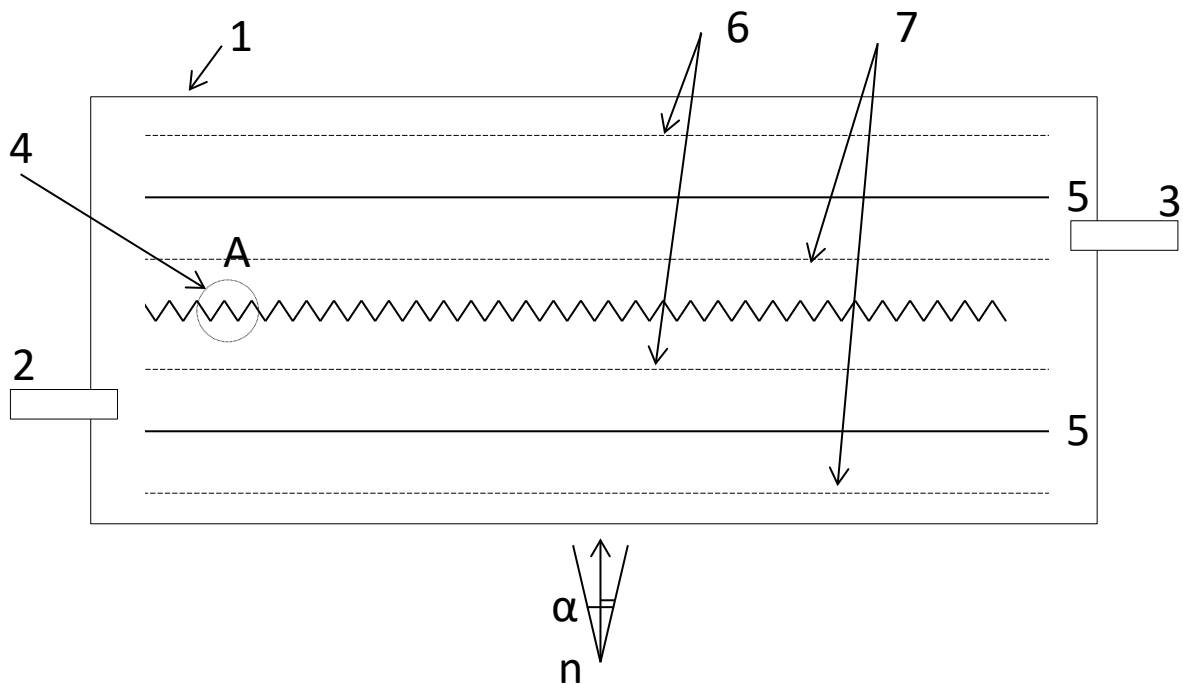


Рис. 1.1.8.11. Сдвоенная многопроволочная пропорциональная камера 5 с твердотельным конвертором $^{10}\text{B}_4\text{C}$, напыленным с двух сторон на общий дрейфовый электрод 4 структурированной формы [1.1.8.13]; 1 – корпус, 2, 3 – газовые патрубки вход-выход; 6, 7 – проволочные катоды (XY-координаты).

Электроны первичной ионизации появляются при выходе в газ сильно-ионизирующих фрагментов: альфа-частицы или ядра лития, см. реакция (1.1.8.1). Зазоры между пластинами с конвертором и проволочными катодами являются дрейфовыми, позволяющими транспортировать электроны из этих зазоров электрическим полем с напряженностью $100\text{-}200\text{ В/см}$ в рабочий объем одной из камер.

На пластину с конвертором 4 подается, например, -100 В . Потенциал на анодных проволочках 5 выбирается положительным и может составлять $1\text{-}2\text{ кВ}$. В сильном электрическом поле в окрестности анодных проволочек, превышающем 20 кВ/см , возникает лавинное умножение электронов – вторичная ионизация. Число первичных электронов в зазоре камеры зависит от энергии вышедшего в газ фрагмента и может составлять несколько тысяч, поэтому в камере достаточно усиления порядка 100 для регистрации сигналов современной электроникой. Движущийся заряд вторичной ионизации, который образуется в окрестности анодной проволочки, индуцирует сигналы как на аноде, так и на обеих катодах в той камере, куда были транспортированы первичные электроны.

Особенность детектора, заключающаяся в том, что захват нейтрона ядром бора происходит только в одном из конверторных слоев (в общем случае – в одном из $2K$ слоев, где K – число конверторных пластин). Следовательно, первичный заряд попадет только в одну камеру (из $K+1$ камер). Эта особенность позволяет по принципу, приведенному на рис. 1.1.8.8, объединить анодные проволочки всех камер вместе в один канал электроники. Кроме того, это позволяет катодные проволочки соединить последовательно в каждой катодной плоскости 6 (X -координата) и 7 (Y -координата). После усиления и дискриминации сигналы с электродов поступают или на входы время-цифровых преобразователей (TDC – Time-to-Digital Converter) или амплитудно-цифровых преобразователей (FADC – Flash Analog-to-Digital Converter). По измеренным величинам временных интервалов или амплитуд сигналов, передаваемым в цифровой форме с выходов TDC или FADC в управляющий компьютер, определяются пространственные X - и Y -координаты нейтрона в детекторе с точностью до номера проволочки.

В предложенной конструкции детектора т.х.н. пластины с конвертором (дрейфовые электроды) просто вставляются в зазоры, например, 5 mm между проволочными камерами и их устанавливается столько, сколько нужно для эффективной регистрации нейтронов с заданной длиной волны. При этом число каналов электроники не зависит от числа пластин K и камер $K+1$.

Достоинством конструкции является то, что на пути нейтронов нет органического вещества, содержащего водород, сильно рассеивающего нейтроны.

Известен вариант 2D-детектора, повышающий эффективность регистрации нейтронов, названный Multi-Blad, в котором между пластинами с конвертором установлены проволочки, т. е. образована MWPC, как показано на рис. 1.1.8.12. Метод наклона тонкого конверторного слоя к направлению движения нейтрона приводит к повышению эффективности регистрации т.х.н. благодаря увеличению эффективной толщины в соответствии с соотношением: $d_{эф} = d/\alpha$, где α – угол наклона.

Анодные проволочки MWPC определяют X -координату, одним катодом MWPC является пластинка с тонкопленочным конвертором, вторым катодом является пластинка со стрипами, измеряющими Y -координату.

Недостаток такой конструкции в том, что при наклоне пластинок с конвертором друг относительно друга по принципу “жалюзи” меняется величина зазора анод-катод, поэтому газовое усиление камеры зависит от координаты и нужно вводить поправку в эффективность [1.1.8.8].

Другой вариант аналогичного детектора, в котором устранен указанный недостаток (MWPC имеет одинаковый зазор анод-катод и усиление) представлен в работах [1.1.8.14, 1.1.8.15].

Недостатком конструкции является наличие органического вещества – каптона толщиной 50 мкм, расположенного под малым углом к траектории нейтронов, что на порядок увеличивает эффективную толщину и сильно рассеивает нейтроны в этих местах.

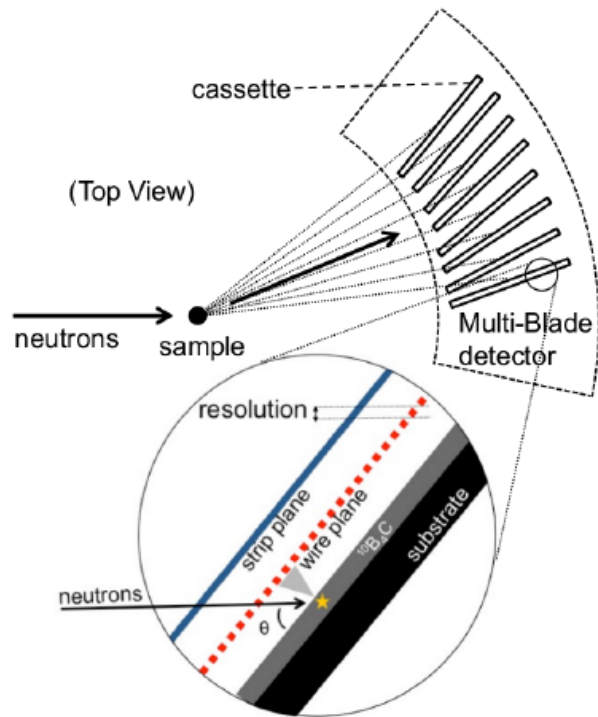


Рис. 1.1.8.12. Размещение пластинок с тонкопленочным конвертером под малым углом к траектории нейтрона в геометрии типа “жалюзи”, принцип Multi-Blad [1.1.8.14, 1.1.8.15].

На рис. 1.1.8.13 приведена конструкция детектора т.х.н. с пластинками, на которые с двух сторон напылен тонкий слой карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, что исключает коробление пластин из-за поверхностных сил и улучшает планарность электродов. При этом введен идентичный первому второй детектирующий слой, с углом поворота пластинок, измененным на противоположный по знаку, с образованием шевронной структуры [1.1.8.16].

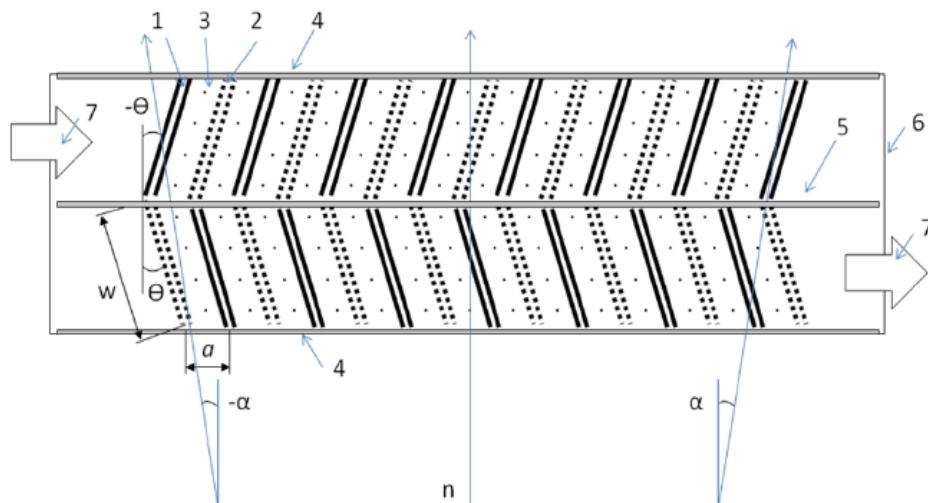


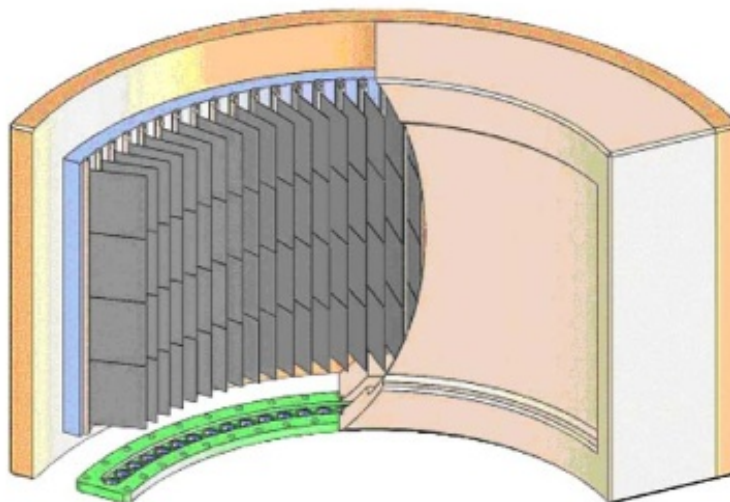
Рис. 1.1.8.13. Конструкция типа “шеврон” 2D-детектора т.х.н. с тонкопленочным конвертором $^{10}\text{B}_4\text{C}$, напыленным с двух сторон на пластинки-подложку [1.1.8.16].

Позиционно-чувствительные детекторы на газонаполненных микроstriповых счетчиках MSGC

Микроstriповый детектор MSGC выполнен на стеклянных пластинках и успешно применяется с гелиевым конвертором [1.1.8.17] в течение 20 лет в дифрактометрах.

В работе [1.1.8.18] для кольцевого дифрактометра MILAND впервые предложена геометрия «жалюзи» на пластинках MSGC с малым углом входа нейтрона в пленку конвертора из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ (рис. 14). Одна сторона MSGC покрыта пленкой с изотопом ^{10}B , а противоположная – регистрирует X, Y координаты. Разные дрейфовые зазоры на внутреннем радиусе 9.7 mm, а на внешнем – 12.5 mm, которые возникают при наклоне пластин на угол 12° , не сказываются на газовом усилении MSGC – существенное преимущество MSGC над MWPC. Кроме того, MSGC в 100 раз быстрее MWPC, так как положительные ионы в 100 раз быстрее покидают промежуток анод-катод, образованный на стеклянной подложке печатным способом. MSGC, в отличие от MWPC, позволяет получить субмиллиметровое пространственное разрешение [1.1.8.17]. Хотя MSGC изобретен 30 лет назад, однако его потенциальные возможности еще не исчерпаны. Так, например, регистрация световых сигналов, возникающих при выходе в газ фрагментов реакции захвата нейтрона ядром бора, позволяет реконструировать 3D-координаты треков и с высокой точностью определить координаты нейтрона, как это делается во время-проекционных камерах (Time-Projection Chamber, TPC), о чем подробнее можно найти в [1.1.8.4].

a



b

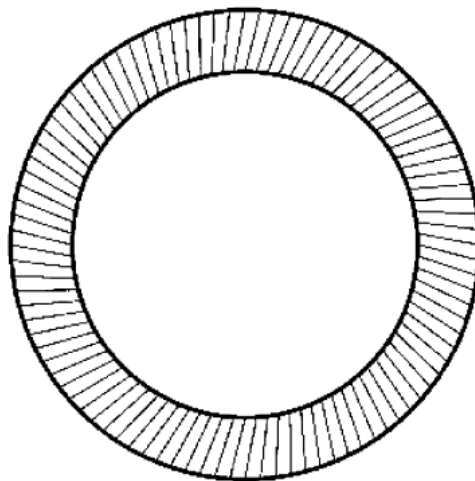


Рис. 1.1.8.14. Геометрия «жалюзи» на микростриповых детекторах MSGC.

Применение микроструктурных детекторов нового поколения MPGD – GEM и MM для регистрации т.х.н.

В составе MPGD⁸ выделяются два основных класса детекторов:

- GEM⁹ с разновидностями [1.1.8.19];
- MicroMeGas с разновидностями [1.1.8.20] – аббревиатура от MicroMesh Gaseous (краткое обозначение, используемое здесь, – MM).

Оба класса MPGD способны заменить MSGC. В отличие от MSGC технология изготовления GEM и MM позволяет получать метровые размеры.

Применение GEM для регистрации т.х.н.

На рис. 1.1.8.15 представлен детектор т.х.н. $100 \times 100 \text{ mm}^2$ с оригинальным вариантом структурированной подложки, названной в работе [1.1.8.21] “микроструктурной” (если сравнивать с рис. 1.1.8.10) с углами при вершине структуры $2\alpha=15^\circ$ и $2\alpha=20^\circ$ с высотой микро-гребней $h=150 \text{ }\mu\text{m}$. Шаг можно найти: $s=\alpha h=20 \text{ }\mu\text{m}$ и $26 \text{ }\mu\text{m}$, соответственно. На структурированную подложку напылен слой тонкопленочного конвертора из чистого ^{10}B в одном варианте толщиной $2 \text{ }\mu\text{m}$, в другом – $4 \text{ }\mu\text{m}$. Здесь GEM выполнен на стекле (GlassGEM), его задача – умножение первичного заряда.

⁸ <https://rd51-public.web.cern.ch/>

⁹ Не путать аббревиатуру GEM – General Materials Diffractometer (дифрактометр на реакторе ISIS) с устоявшейся в англоязычной литературе аббревиатурой GEM – Gaseous Electron Multiplier.

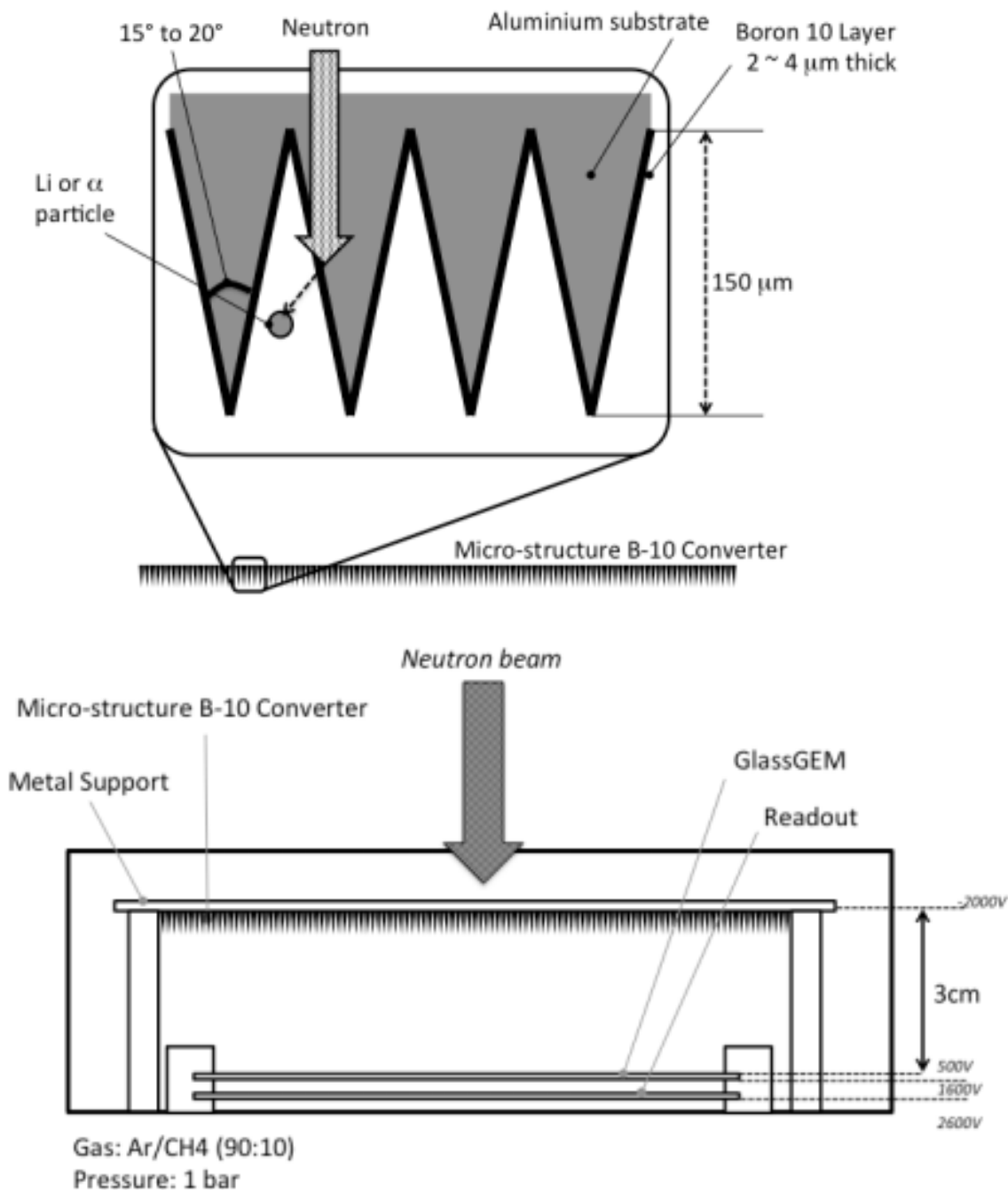


Рис. 1.1.8.15. Микроструктурированная алюминиевая подложка с нанесенным на ее поверхность с одной стороны тонкопленочным конвертором ^{10}B толщиной 2-4 μm (a) выполняет функцию дрейфового электрода GEM-детектора с рабочим зазором 30 мм (b), ниже GEM расположен считывающий электрод, при помощи которого измеряются X, Y координаты.

На расстоянии 30 мм выше GEM расположен конвертор ^{10}B толщиной 2-4 μm в виде дрейфового электрода (микроструктура), ниже уровня GEM на дне индукционного зазора ~ 2 мм размещен считывающий электрод, при помощи которого измеряются X, Y координаты.

В качестве рабочего газа используется аргон-метановая смесь $\text{ArCH}_4(10\%)$ при давлении 3.1 bar. При таком давлении треки фрагментов реакции (1.1.8.1), вышедшие в газ, полностью укладывались в зазоре 30 mm.

На рис. 1.1.8.16 представлены амплитудные спектры сигналов от тепловых нейтронов $\lambda=1.7-1.8 \text{ \AA}$ и гамма-фона, полученные на этом детекторе при усилении GEM равном 20 на слое конвертора 2 \mu m с углами при вершине структуры 15° .

В работе не приводится, какие получены пространственное разрешение, эффективность регистрации т.х.н. и какая чувствительность к гамма-фону.

Однако легко оценить, что для указанных углов эффективная толщина конвертора составила 30 \mu m с одной микроструктурной подложкой. Используя рис. 1.1.8.4, можно оценить эффективность: не менее 60% для $\lambda=1.8 \text{ \AA}$.

Что касается пространственного разрешения, то благодаря *микроструктуре* пробеги фрагментов не “сносили” координаты точки захвата нейтрона ядром ^{10}B (на рис. 1.1.8.15 авторами показан точечный заряд), так что пространственное разрешение детектора высокое – субмиллиметровое.

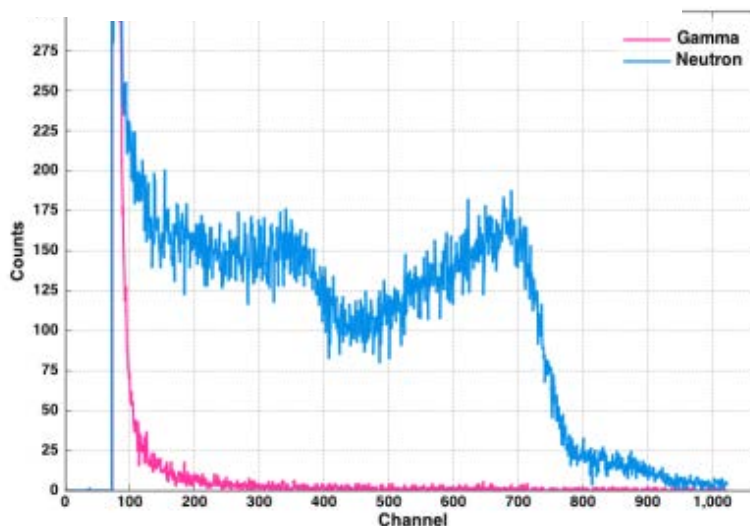


Рис. 1.1.8.16. Амплитудные спектры от тепловых нейтронов и гамма-фона для толщины пленки конвертора 2 \mu m с углом при вершине микроструктурной подложки $2\alpha=15^\circ$.

Это техническое решение PSD предложено для рефлектометров и приборов малоуглового рассеяния нейтронов, как альтернатива гелиевому детектору. Энергия нейтронов, соответствующая длине волны $\lambda=1.7-1.8 \text{ \AA}$, определялась по времени пролета, т.к. временное разрешение такого детектора с GEM, созданного для J-PARC, составило 10 ns при напряженности поля в дрейфовом зазоре 400 V/cm – в 100 раз выше чем гелиевого PSD.

Оригинальным является детектор т.х.н. CASCADE [1.1.8.22, 1.1.8.23], выполненный на классическом GEM (фольгированная с двух сторон пленка из каптона толщиной 50 \mu m со

сквозными отверстиями в гексагональной геометрии, диаметром 50-70 μm и шагом 140 μm . Детектор выполнен из двух идентичных по устройству “половинок”, в каждой – три пленки GEM (каскад), как показано на рис. 1.1.8.17 и 6 слоев конвертора, чтобы набрать эффективную толщину конвертора, всего – 12 слоев.

Изотоп бора ^{10}B нанесен вакуумным напылением поверх меди на готовый GEM с микроотверстиями. Чистый бор не является ни хорошим диэлектриком, ни проводником, его удельное сопротивление $1.8 \cdot 10^6 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$, поэтому нанесение его на медь не приводит к накоплению заряда на поверхности бора, а попадание бора на стенки микроотверстий не приводит к нежелательному увеличению темнового тока. Пленки бора, обогащенного до 90% изотопом ^{10}B , толщиной 1.2-1.4 μm нанесены также на катоды – дрейфовые электроды структуры и на обе стороны GEM за исключением последнего GEM в каскаде, который через индукционный зазор передает заряд электронов на считывающий электрод для определения X, Y координат.

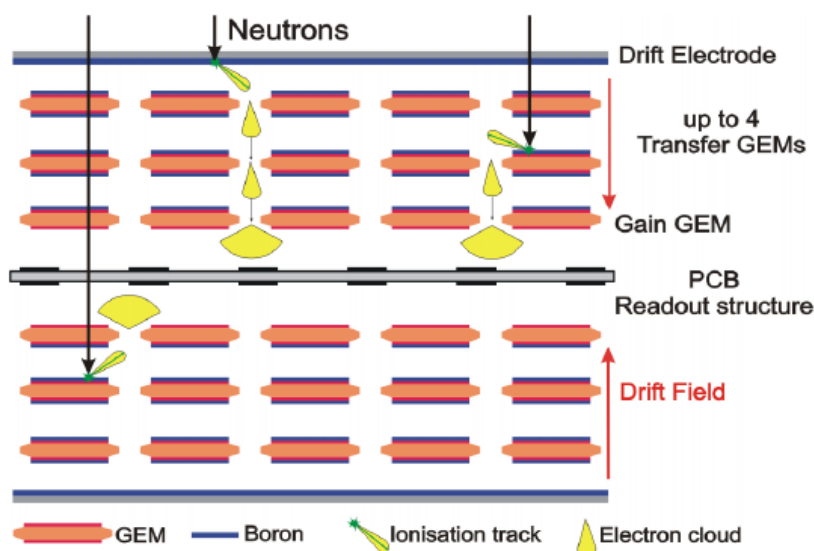


Рис. 1.1.8.17. Детектор т.х.н. CASCADE, выполненный на тонкопленочных конверторах ^{10}B , число слоев которых выбирается по необходимой эффективности регистрации нейтронов.

Все GEM в каскаде работают в ионизационном режиме без усиления, а последний – с небольшим усилением 10-30. Первичный заряд (~50 тысяч электронов) транспортируется от точки образования до последнего GEM, где усиливается, а затем собирается на стрипах, выполняющих функцию анода структуры. Сигналы на стрипах наводятся электронами без баллистического дефицита¹⁰. Быстродействие детектора CASCADE достигает 10^7 c^{-1} .

Пространственное разрешение детектора CASCADE приведено на рис. 1.1.8.18 и рис. 1.1.8.19. Как видно, из-за большого пробега фрагментов реакции (1.1.8.1) в газе $\text{Ar}/\text{CO}_2(10\%)$ при

¹⁰ Баллистический дефицит возникает тогда, когда время интегрирования много меньше времени собирания заряда.

атмосферном давлении, в приведенном распределении есть “хвосты”. При необходимости пространственное разрешение детектора можно улучшить увеличением давления рабочего газа за счет сокращения пробега продуктов реакции (1.1.8.1), см. рис. 1.1.8.19.

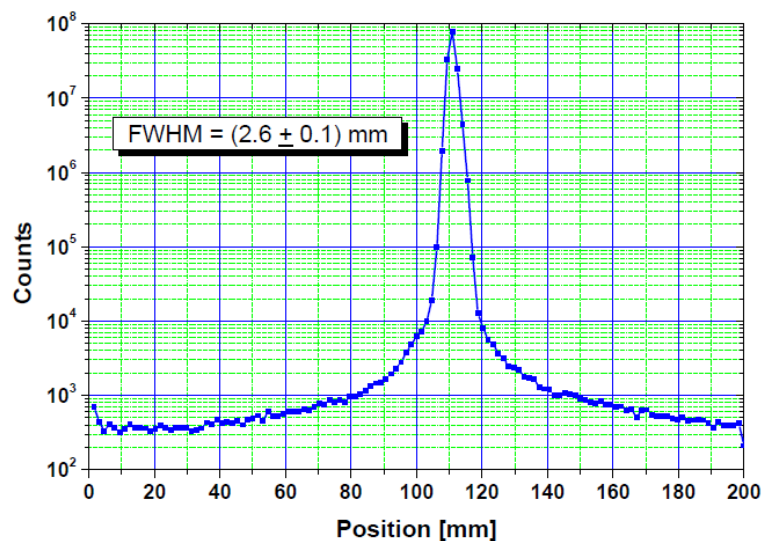


Рис. 1.1.8.18. Пространственное разрешение детектора т.х.н. CASCADE.

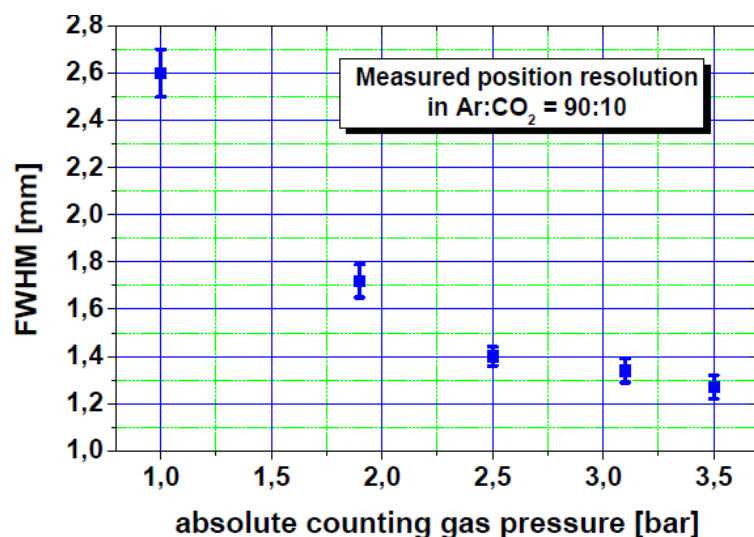


Рис. 1.1.8.19. Улучшение пространственного разрешения детектора CASCADE с увеличением давления газовой смеси.

Необходимо отметить, что на стенках микроотверстий GEM накапливаются заряды, что приводит к нестабильному во времени газовому усилению при изменении загрузки. При включении высокого напряжения установившееся значение коэффициента газового усиления происходит в течение часа. После спонтанного электрического пробоя в газе¹¹ потребуется столько же времени

¹¹ Спонтанные пробоя в газе могут возникать в результате взаимодействия частиц высоких энергий или космического излучения с элементами конструкции при рождении сильно ионизирующих газ частиц и ядер.

для достижения установившегося режима. Это – серьезный недостаток GEM применительно к регистрации т.х.н., где стабильность счета считается одной из важнейших характеристик.

В работе [1.1.8.24] повторили идею CASCADE, при этом сделали детектор с активной площадью $150 \times 150 \text{ mm}^2$ как на классическом GEM на каптоне $50 \text{ }\mu\text{m}$ с отверстиями $50\text{-}70 \text{ }\mu\text{m}$, так и на жидкокристаллическом полимере (LCP) толщиной $100 \text{ }\mu\text{m}$ с отверстиями диаметром $90 \text{ }\mu\text{m}$ с вертикальными стенками, на которых меньше накапливается зарядов. На газовой смеси ArCO_2 (30%) получено пространственное разрешение 1 mm , а временное разрешение 10 ns .

В работе [1.1.8.25] выполнили детектор т.х.н. по принципу CASCADE на THGEM – толстом GEM с активной площадью $50 \times 50 \text{ mm}^2$, с толщиной подложки из керамики $200 \text{ }\mu\text{m}$, диаметром отверстий $200 \text{ }\mu\text{m}$ и шаге $500 \text{ }\mu\text{m}$, где нанесли 11 слоев чистого ^{10}B толщиной $2.5 \text{ }\mu\text{m}$ (суммарная толщина $\sim 30 \text{ }\mu\text{m}$), один на катод и 10 на обе стороны пяти перфорированных THGEM. Расстояние между слоями составляло 2 mm . Альфа-частицы с энергией 1 MeV теряли 200 keV/mm , создавая на треке ~ 15 тысяч электронов (заряд 2.5 fC). Электроны без умножения транспортировались к шестому THGEM, который усиливал заряд. Характеристики детектора исследовались на источнике ^{252}Cf ($\sim 10^6 \text{ n/s}$), счетное плато составило 300 V ($1600\text{-}1900 \text{ V}$) на газовой смеси $\text{ArCO}_2(10\%)$.

В работе [1.1.8.26] приведен другой вариант устройства демонстрационного детектора типа CASCADE – “multi-boron GEM (MBGEM): a stack of borated GEM detector for high efficiency thermal neutron detection”, размеры которого $30 \times 30 \text{ mm}^2$.

В отличие от [1.1.8.21] здесь на поверхность GEM нанесен карбид бора, обогащенный изотопом ^{10}B до 95%, имеющий электропроводность на 9 порядков выше, чем чистый ^{10}B (на рис. 1.1.8.20 – нижние 3 пленки). По этой причине напыление производилось на фольгированный каптон толщиной $50 \text{ }\mu\text{m}$ с двух сторон до травления отверстий в каптоне. Работа выполнялась совместно с ESS, где произведено напыление $^{10}\text{B}_4\text{C}$ и была разработана специальная технология напыления с хорошей адгезией. Травление сквозных отверстий производилось в CERN, что также потребовало особой технологии, так как сначала производилось травление фоторезиста, нанесенного на каптон с двух сторон, до напыления карбида бора. С удалением фоторезиста удалялся карбид бора в тех местах, где должны быть отверстия.

Таблица 1.1.8.3. Электропроводность материалов (см. ^{10}B и $^{10}\text{B}_4\text{C}$).

material	$\rho_e(\Omega \cdot m)$
^{nat}Li	10^{-7}
pure 6Li	10^{-7}
^{nat}B	10^6
pure ^{10}B	10^6
^{nat}LiF	10^{-8}
96% enriched 6LiF	10^{-8}
$^{nat}B_4C$	10^{-3}
98% enriched $^{10}B_4C$	10^{-3}
glass	$> 10^9$
Si	1
graphite	10^{-5}
Cu	10^{-8}

Верхние 3 пленки на рис. 1.1.8.20 – классический Triple-GEM, который производится уже много лет. Собранный детектор MBGEM представлен на рис. 1.1.8.20.

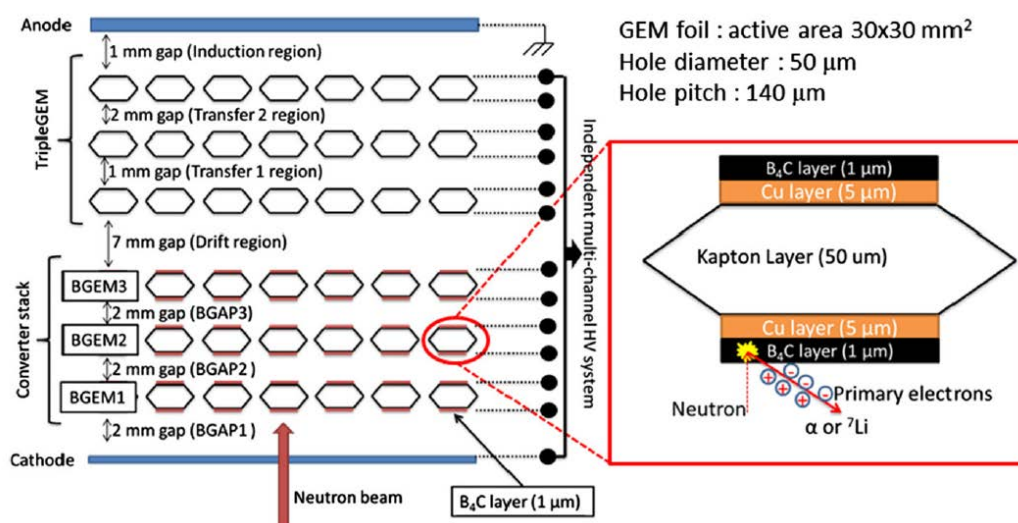


Рис. 1.1.8.20. Детектор т.х.н. MBGEM, выполненный на тонкопленочных конверторах толщиной 1 μm из карбида бора, обогащенного изотопом ^{10}B до 95%, с шестью слоями [1.1.8.24].

Как показано в работе [1.1.8.27], измерение угла наклона треков путем измерения времени дрейфа первичных электронов к стирпам на считывающем электроде, дает пространственное разрешение $\sim 200 \mu m$. Аналогичные измерения, выполненные в работе [1.1.8.25], дали пространственное разрешение $235 \pm 25 \mu m$ ($\sigma = 100 \pm 15 \mu m$).

Пространственное разрешение в XY плоскости, полученное по центру тяжести заряда, образованного фрагментами в газе, на порядок хуже, как видно из рис. 1.1.8.18.

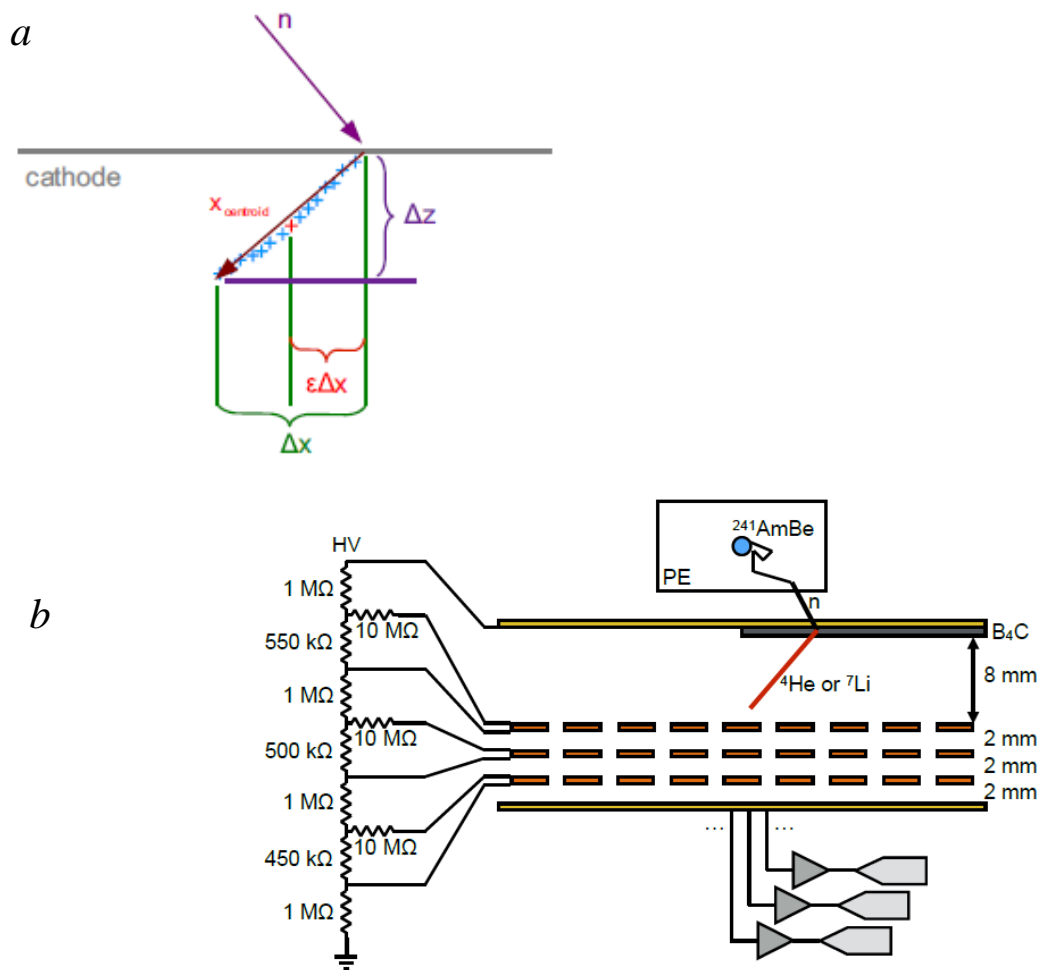


Рис. 1.1.8.21. Схема регистрации трех координат X, Y, Z точки захвата нейтрона в пленочном конверторе ^{10}B (a) по наклону треков и устройстве для реализации на Triple-GEM детекторе (b) [1.1.8.27], достаточно информации с трех смежных каналов.

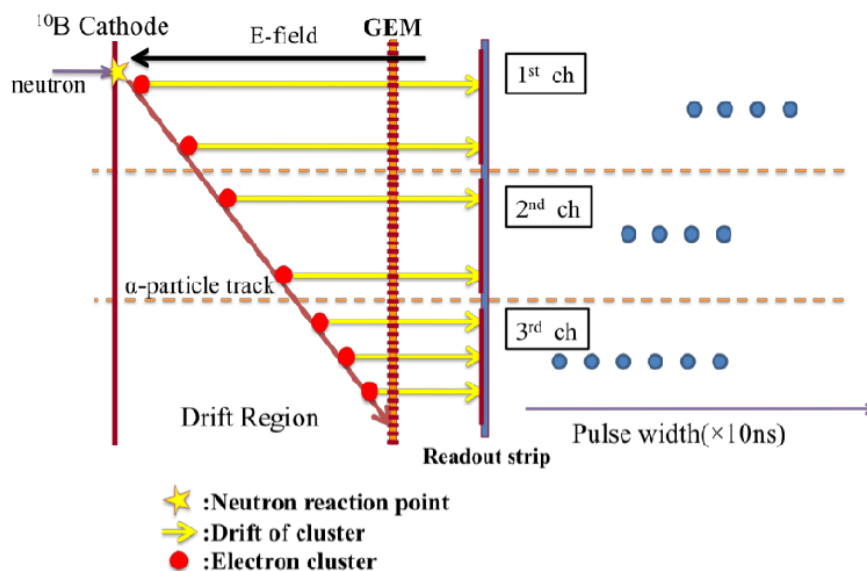


Рис. 1.1.8.22. Схема регистрации трех координат X, Y, Z точки захвата нейтрона в пленочном конверторе ^{10}B по наклону треков с использованием GEM-детектора [1.1.8.28].

Применение ММ для регистрации т.х.н.

Детектор Микро-Megas (ММ) столь же популярен в физике высоких энергий, как и GEM.

Сразу отметим, его преимущество, которое заключается в том, что микросетка – основа детектора производится на ткацком оборудовании рулонами и стоит дешево. Усовершенствованная технология производства ММ с высокой планарностью¹² позволяет строить метровые детекторы.

На рис. 1.1.8.23 приведена схема демонстрационного детектора т.х.н. [1.1.8.29], где с применением ММ и тонкопленочного конвертора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ ($1-2 \mu\text{m}$), нанесенного на катод и на две микросетки из никеля, отстоящие от катода и друг от друга на расстояние 1 mm, получена эффективность 50%.

Очевидно, что число сеток можно увеличить. Здесь сетки “прозрачны” для электронов, заряд передается без умножения.

К другому важному достоинству детектора ММ в сравнении с GEM следует отнести то, что в нем нет *органики* на пути нейтронов, содержащей водород, сильно рассеивающий нейтроны. И еще – здесь нечему заряжаться, поэтому коэффициент газового усиления и счетная характеристика стабильны во времени, чего нет в GEM.

¹² Andriamonje S., et al. Development and performance of Microbulk Micromegas detectors. JINST 2010, 5, P02001. Appl. Sci. 2021, 11(12), 5362; <https://doi.org/10.3390/app11125362>

Для минимизации “сноса” X, Y координат при регистрации центра тяжести заряда от длиннопробежных фрагментов реакции захвата нейтрона, очевидно, необходимо уменьшать зазоры.

ММ применим для метода регистрации трех координат X, Y, Z точки захвата нейтрона в пленочном конвертере ^{10}B по наклону треков, как было показано на рис. 1.1.8.21 и рис. 1.1.8.22.

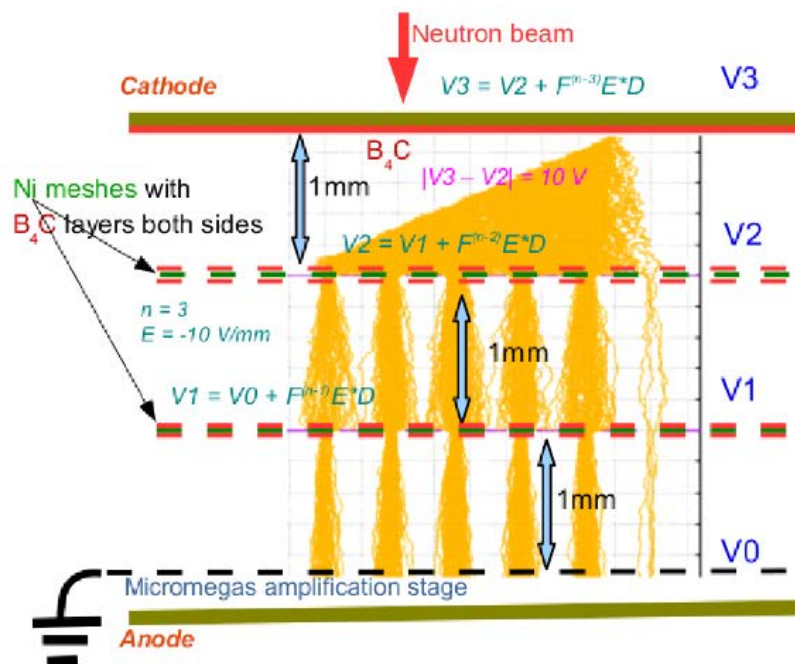


Рис. 1.1.8.23. Многослойный детектор т.х.н.с применением ММ [1.1.8.29].

Детекторы с высоким временным разрешением с тонкопленочным изотопом ^{10}B для резонансной нейтронной эхо-спектроскопии

В современной физике конденсированных сред есть запрос на детекторы холодных нейтронов ($\lambda=3-20 \text{ \AA}$) с высоким временным разрешением порядка 10 ns для создания резонансных эхо-спектрометров [1.1.8.30] и исследования структуры и динамики наноразмерных систем различной природы с рекордно высоким энергетическим разрешением $\sim 10^{-9} \text{ eV}$.

Сцинтилляционные детекторы, выполненные на $\text{ZnS(Ag)}/^6\text{LiF}$, не обладают таким временным разрешением, у них $\sim 1 \text{ \mu s}$ из-за большого времени собирания фотонов.

Детекторы, выполненные на газовых конверторах ^3He и $^{10}\text{BF}_3$, обладают еще худшим временным разрешением, поэтому также не пригодны для решения поставленной задачи.

Все детекторы, приведенные выше, выполненные на GEM с использованием тонкопленочного конвертора изотопа ^{10}B , показывают временное разрешение $\sim 10 \text{ ns}$ [1.1.8.21-1.1.8.27].

Такое высокое временное разрешение должно сочетаться с высоким пространственным разрешением вдоль траектории нейтронов 10-100 μm , для чего необходимо определять номер слоя, в котором произошел захват нейтрона. Указанным требованиям удовлетворяет детектор CASCADE-MIEZE [1.1.8.31, 1.1.8.32], выполненный иначе описанного выше CASCADE [1.1.8.22, 1.1.8.23].

В методе MIEZE (Modulation of Intensity by Zero Effort) интенсивность нейтронного пучка модулируется флипперами с радиочастотой, близкой к ларморовской частоте прецессии нейтронов не только во времени, но и в пространстве вдоль пучка (MIEZE частота 654 kHz, период модуляции 1.2mm для нейтронов с $\lambda = 5 \text{ \AA}$, $v \approx 800 \text{ m/s}$).

Схема детектора CASCADE-MIEZE с размерами активной площади $200 \times 200 \text{ mm}^2$ представлена на рис. 1.1.8.24 [1.1.8.31]. Эффективность регистрации нейтронов (4 конвертора): 20% для $\lambda = 5 \text{ \AA}$; 60% для $\lambda = 6 \text{ \AA}$.

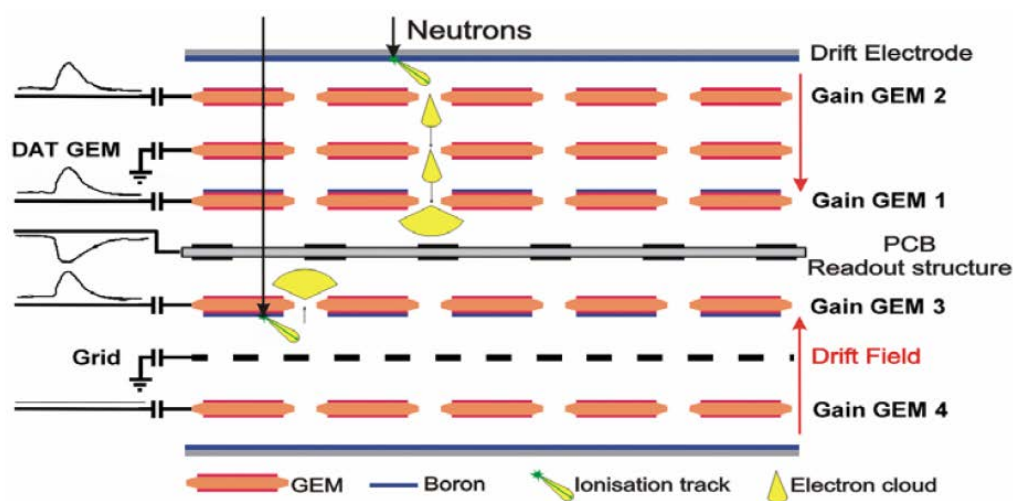


Рис. 1.1.8.24. Детектор CASCADE-MIEZE, выполненный на тонкопленочных конверторах ^{10}B , определяющий номер “сработавшего” слоя с твердотельным конвертором ^{10}B [1.1.8.31].

Зазоры между GEM – 2 mm.

Как видно, схема отличается от схемы, приведенной на рис.1.1.8.17, тем, что позволяет определять, какой слой конвертора “сработал”. Так, если нейтрон захвачен ядром ^{10}B в слое, нанесенном на дрейфовый электрод (верхнем на рисунке), то появится сигнал на GEM2. Если нейтрон захвачен ядром ^{10}B в слое, нанесенном на поверхность GEM1, то появится сигнал на GEM1. Электрическое поле в окрестности ближайшего отверстия направит первичный заряд электронов в область умножения GEM1 (GEM2 работает в режиме транспортировки без умножения), а PCB Readout Structure позволит определить X, Y координаты.

Координата Z вдоль траектории нейтрона определяется положением слоя “сработавшего” конвертора. Аналогично работает нижняя “половинка”, где размещены GEM3 и GEM4. Показанная внизу Grid выполняет ту же функцию электростатического экрана, что и перфорированная пленка между GEM1 и GEM2. Пространственное разрешение по X, Y 2.5 mm. Плата, считывающая X, Y координаты, содержит стрипы 128+128=256 каналов, 16284 пикселей.

Блок-схема электроники детектора выполнена на 64-канальных чипах и программируемой логике, каждый канал обеспечивает счет 330 кГц с 10% просчетами по мертвому времени.

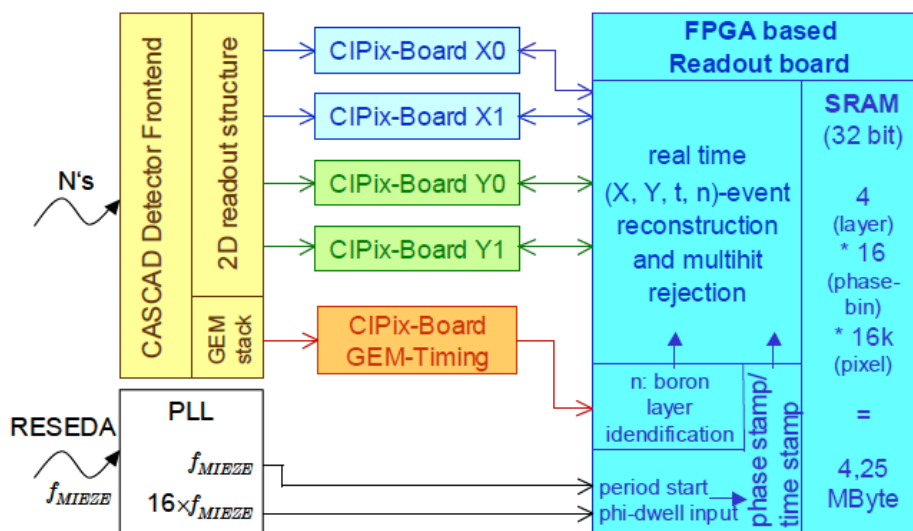


Рис. 1.1.8.25. Блок-схема электроники детектора, выполненная на 64-канальных чипах и программируемой логике (каждый канал обеспечивает счет 330 кГц с 10% просчетами по мертвому времени).

Отметим недостатки схемы CASCADE-MIEZE. Пробег альфа-частиц в газе при атмосферном давлении приблизительно составляет 7 mm, а ядер лития – 4 mm. Выбранные зазоры между GEM 2 mm, с одной стороны, не позволяют получить достаточный первичный заряд, превышающий шумы электроники, поэтому GEM 2 (GEM4) должны усиливать заряд как минимум в 10 раз (аналогично работают GEM1 и GEM3). В итоге получается разное усиление для разных слоев конвертора: 10 – для верхнего и 100 – для нижнего. В этом техническом решении трудно ввести еще слои, т.к. разность в усилении вырастет в 1000 раз.

С другой стороны, зазоры между GEM 2 mm приводят к «сносу» X, Y координат при больших наклонах треков, что ухудшает пространственное разрешение (см.рис. 1.1.8.18).

К недостаткам приведенной схемы следует также отнести то, что на 4 слоя конвертора здесь 6 слоев “органики” и одна печатная плата, содержащие водород, сильно рассеивающий нейтроны.

Как отмечалось выше, в работе [1.1.8.25] выполнили детектор по принципу CASCADE на толстом GEM (THGEM –ThickGEM). В качестве материала для THGEM были выбраны листы

с керамическим наполнителем, армированные стекловолокном фирмы Rogers RO5603 с меньшим количеством водорода чем в стеклотекстолите FR4.

Очевидно, что детектор можно переделать в CASCADE-MIEZE, следуя тому же принципу, как показано на рис. 1.1.8.24.

В работах [1.1.8.33, 1.1.8.34] представлены детекторы GEM колодезного типа без индукционного зазора: WELL (колодец) и RWELL (с резистивным анодом), которые обладают высоким временным разрешением и также могут быть применены для создания детекторов т.х.н. с конвертором $^{10}\text{B}_4\text{C}$, нанесенном на катод. Детектор типа CASCADE-MIEZE может быть выполнен из нескольких модулей WELL (RWELL) в общем газонаполненном корпусе, в каждом модуле один конвертор. При таком техническом решении усиление одинаковое в каждом модуле и число модулей не ограничено. Ограничением может быть только допустимая концентрация водорода на пути нейтронного пучка.

В работе [1.1.8.35] исследуется детектор с Многопроволочным Электронным Умножителем (МПГЭУ).

Отличительной особенностью технического решения является отсутствие органики (поддерживающие проволочки спейсеры, занимают 1% активной площади) и отсутствие печатной платы на пути нейтронного пучка, т.к. координаты X и Y определяют взаимно ортогональные проволочки МПГЭУ, объединенные в стрипы.

На рис. 1.1.8.26 показано электрическое поле в ячейках, образованных взаимно ортогональными проволочными электродами.

Число эквипотенциалей в зазоре умножения h зависит от напряжения между проволочными электродами и характеризует коэффициент газового усиления, на рис. 1.1.8.26 $n=12$ соответствует коэффициенту усиления $2^{12} \approx 4000$. Для регистрации т.х.н. по сильноионизирующим газ фрагментам реакции (1.1.8.1) достаточно усиления 10-100.

Детектор типа CASCADE-MIEZE также может быть выполнен из модулей МПГЭУ, размещенных в общем газонаполненном корпусе, в каждом модуле один конвертор, в такой схеме номер “сработавшего” конверторного слоя, как и координаты X, Y, определяется по сигналам на проволочках по схеме, см. рис. 1.1.8.25.

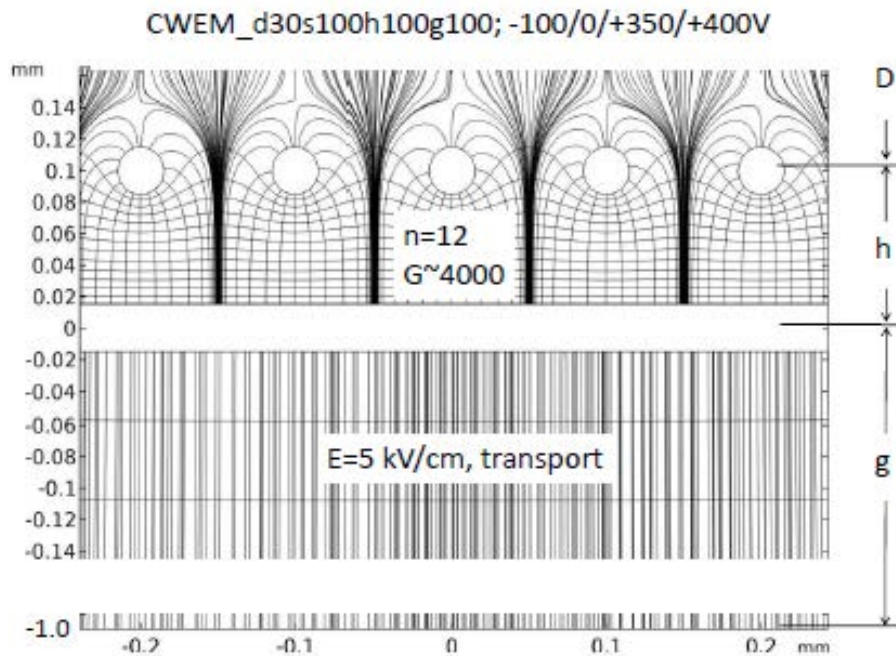


Рис. 1.1.8.26. Линии напряженности и эквипотенциали электрического поля между проволочками МПГЭУ: D – дрейфовый зазор, в котором образуется первичный заряд; h – зазор умножения; g – индукционный зазор [1.1.8.35].

Заключение

Тонкопленочный изотоп бора ^{10}B является хорошей альтернативой резко подорожавшему газовому конвертору ^3He . Так, на карбиде бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, обогащенном до 90-99 % изотопом ^{10}B , строится значительная часть современных детекторов ESS. Из отмеченного выше, по мнению авторов, представляют интерес для внедрения в эксперименты по ФКС в РФ следующие технические решения:

- 1) Строу-трубки, работающие на продув, причем малого диаметра, например, 2 mm, с $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на катоде, т.к. относительно легко изготавливаются намоткой на стержень длиной 1 метр и более.
- 2) Проволочные пропорциональные камеры (MWPC).
- 3) Перспективными являются микроструктурные детекторы GEM и MicroMegas (MM), они превосходят строу-трубки и MWPC по многим характеристикам, прежде всего – по быстродействию и временному разрешению.

К недостаткам GEM по сравнению с MM следует отнести наличие “органики” (каптона), содержащего водород, сильно рассеивающего нейтроны; накопление зарядов на поверхности отверстий, как следствие – нестабильность счета во времени при изменении загрузки; дороже MM (основной элемент MM – микросетка выпускается рулонами).

4) Перспективными представляются двухкоординатные МПГЭУ, практически не содержащие “органики”.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1.1.8.1] Position-Sensitive Detection of Thermal Neutrons / Edited by *Convent P. and Forsyth. J.B.* Academic Press Inc. London. 1983. 429 P.
- [1.1.8.2] *Hall-Wilton R.* // CREMLIN Workshop, May 13-16, 2018, St. Petersburg.
https://indico.frm2.tum.de/event/65/sessions/294/attachments/202/333/180513_PNPIInstr_10BDetectors_RJHW-reduced-size.pdf
- [1.1.8.3] *Piscitelli F. and Van Esch P.* // 2013 JNST 8 P04020.
- [1.1.8.4] *Кацук А.П., Левицкая О.В.* // ЖТФ 2020, том 90, вып. 5.
- [1.1.8.5] *Van der Ende B.M., Rand E.T., Erlandson A., Li L.* // Nucl. Instr. and Meth. A 894. 2018. P.138–144.
- [1.1.8.6] *Lacy J.L., et al.* // IEEE Trans. NS v. 60. №2. 2003. P. 1140-1146.
<http://doi.org/10.1109/NSSMIC.2011.6154533>
- [1.1.8.7] *Lacy J.L., et al.* // Journal of Neutron Research 22 (2020) 353–369 DOI 10.3233/JNR-190138.
- [1.1.8.8] *Piscitelli F., et al.* // JNST 9 P03007 2014.
- [1.1.8.9] *Guerard B., Buffet J.* // Patent US Patent App. 13/038,915, no. 20110215251.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/54/45/a7/6c07ac4c63bb62/US20110215251A1.pdf>
- [1.1.8.10] *Piscitelli F.* Boron-10 layers, Neutron Reflectometry and Thermal Neutron Gaseous Detectors. Theses PhD. 2013. 186 P.
https://www.ill.eu/fileadmin/user_upload/ILL/1_About_ILL/List_of_PhD_thesis/Piscitelli_PhDthesis_c.pdf
- [1.1.8.11] *Stefanescu I., et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A727 (2013) 109-125.
- [1.1.8.12] *Stefanescu I., et al.* // 2013 JINST 8 P12003; arXiv:1309.7789v1.
- [1.1.8.13] *Кацук А.П., Левицкая О.В., Чураков А.В.* // Патент № 174185 (2017).
- [1.1.8.14] *Mauri G., et al.* // JNST 13 P03004 2018.
- [1.1.8.15] *Messi F., et al.* The Multi-Blade: The 10B-based neutron detector for reflectometry at ESS // <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.058>
- [1.1.8.16] *Кацук А.П., Левицкая О.В., Чураков А.В.* // Патент №183457 (2018).
- [1.1.8.17] *Oed A.* // Nucl. Instr. and Meth. A 263. 1988. P.62–68.
- [1.1.8.18] *Buffet J.C., et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A554. .2005. P. 392-405.
- [1.1.8.19] *Sauli F.* // Nucl. Instr. and Meth. A386. 1997. P. 531–534.
- [1.1.8.20] *Giomataris Y. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A376. 1996. P. 29–35.

- [1.1.8.21] *Fujiwara T.*, et al. // 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC); <https://ieeexplore.ieee.org/document/6829580>
- [1.1.8.22] *Klein M., Schmidt C. J.* // Nucl. Instr. and Meth. A628. 2011. P. 9-18.
- [1.1.8.23] *Köhli M.*, et al. // Nucl. Instr. and Meth. A828. 2016. P. 242-249.
- [1.1.8.24] *Uno S.*, et al. // Physics Procedia 26 (2012) 142 – 152.
- [1.1.8.25] *Li Ke*, et al. // Chinese Physics C Vol. 40, No. 7 (2016) 076002.
- [1.1.8.26] *Muraro A.*, et al. // Eur. Phys. J. Plus (2021) 136:742.
<https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01707-2>
- [1.1.8.27] *Pfeiffer D.*, et al. // arXiv:1501.05022v1 (2015), 2015 JINST 10 P04004.
- [1.1.8.28] *Shoji M.*, et al. // 2012 JINST 7 C05003; doi:10.1088/1748-0221/7/05/C05003.
- [1.1.8.29] *Tsiledakis G.*, et al. // Universe 2018, 4, 134; doi:10.3390/universe4120134.
- [1.1.8.30] *Дубовский И.М., Лебедев В.Т., Серебров А.П.*
<https://oiks.pnpi.spb.ru/media/muromets2016/%D0%94%D0%B5%D0%BD%D1%8C%203/%D0%94%D1%83%D0%B1%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf>
- [1.1.8.31] *Schmidt C. J.* et al. // 2010 J. Phys.: Conf. Ser. 251 012067; doi:10.1088/1742-6596/251/1/012067.
- [1.1.8.32] *Geerits N.* et al. // Rev. Sci. Instrum. 90, 125101 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5123987>
- [1.1.8.33] *Kashchuk A.*, et al. // 2020 JINST 15 C09041.
- [1.1.8.34] *Kashchuk A.*, et al. // 2020 JINST 15 C09018._
- [1.1.8.35] *Kashchuk A.*, et al.
<https://indico.jinr.ru/event/2444/contributions/14611/attachments/11246/18486/Poster-NTNPD2021%285%29%20v05.pdf>

Приложения.

1. Отчет о проведенных исследованиях по определению оптимальной конструкции регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертором. Файл Прилож.1.1.8.pdf

1.1.9 Создание прототипа одномерного позиционно- чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей (совместно с НИЦ КИ ПИЯФ Договор 400/1995 от 25.11.2021).

Описание прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика

В ходе работ по проекту на первом этапе был разработан и изготовлен прототип одномерного позиционно-чувствительного счетчика (ПЧД) нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей. Прототип предназначен для регистрации рассеянного нейтронного излучения с высоким разрешением на установках реактора ПИК.

Базовая конструкция одномерного ПЧД основана на комбинации сцинтиллятора ZnS/6LiF, световода и кремниевых (твердотельных) фотоэлектронных умножителей.

Счетчик нейтронов состоит из одного слоя чувствительного к нейтронам сцинтиллятора ZnS/6LiF, приклеенного с помощью оптического цемента к световоду из оптически прозрачного материала – оргстекла. Для достижения высокой точности регистрации нейтронов используется световод из органического стекла с коэффициентом пропускания 92%.

На рис. 1.1.9.1 и 1.1.9.2 представлены фотографии прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика (ПЧД) нейтронов на основе сцинтиллятора ZnS/6LiF.



Рис. 1.1.9.1. Прототип одномерного ПЧД на основе сцинтиллятора ZnS/6LiF. Вид сбоку.

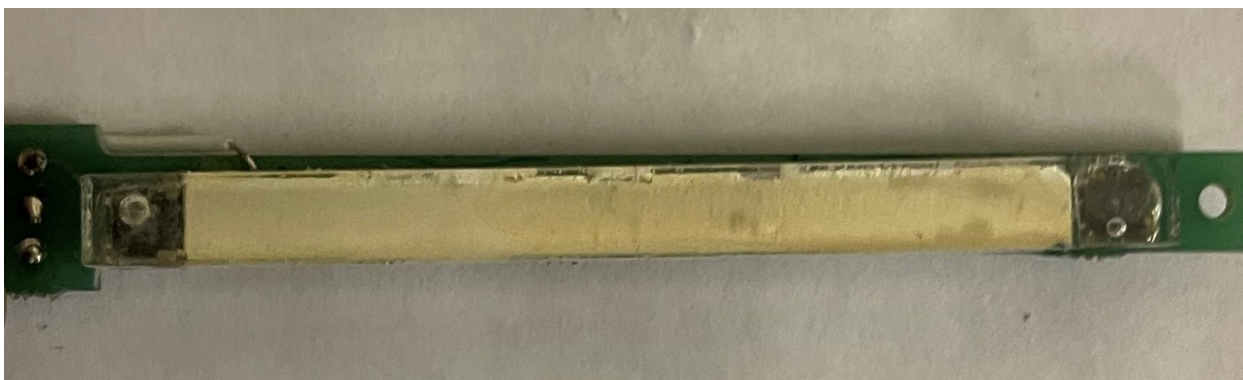


Рис. 1.1.9.2. Прототип одномерного ПЧД на основе сцинтиллятора ZnS/6LiF. Вид сверху.

Регистрация нейтронов происходит следующим образом. Нейтрон, попав в сцинтиллятор, вызывает вспышку света, которая распространяется по световоду к двум кремниевым

фотоумножителям (SiPM), закрепленным на концах счетчика в специально вырезанных линзах, заполненных оптическим клеем. SiPM регистрируют дошедшие до них фотоны.

В зависимости от расстояния, пройденного светом, меняется его интенсивность и на этом основан метод получения координаты – на сравнении значений амплитуды и/или заряда с двух SiPM, расположенных на концах счетчика.

Сигналы с обоих концов световода регистрируются двумя кремниевыми фотоумножителями и поступают на зарядочувствительные предусилители, далее – в усилитель-формирователь для формирования сигнала. Затем через сумматор и дискриминатор нижнего уровня сигналы поступают в аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для обработки, а затем в компьютер с регистрирующей программой, которая выводит полученный спектр с координатами зарегистрированных нейтронов.

Выбор базовой конструкции прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей основывается на новом методе определения координаты, а также с учетом следующих критериев:

- 1) высокая эффективность регистрации (70-90%) в широком диапазоне длин волн падающего излучения;
- 2) стабильность рабочих характеристик в процессе эксплуатации в течении длительного времени;
- 3) низкая чувствительность к гамма- излучению;
- 4) большой ресурс работы детектора без необходимости технического обслуживания;
- 5) надежность и простота обслуживания.

Проведение испытаний прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика

Для обеспечения проведения испытаний прототипа сцинтилляционного ПЧД была разработана Программа и методики испытаний ОПЧД.01.00.00.00.000 ПМ. В документе рассматривается процесс проведения исследований объекта испытаний: прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика на основе сцинтиллятора ZnS:⁶LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей.

На испытания был представлен прототип сцинтилляционного ПЧД с характеристиками, представленными в таблице 1.

Таблица 1.1.9.1. Технические характеристики сцинтилляционного ПЧД

Размер активной зоны	5x50 мм
Чувствительность к гамма фону	не более 1×10^{-7}
Быстродействие детектора	не менее 1×10^6 нейтронов/сек

Высокая радиационная стойкость и время жизни, снижение эффективности регистрации нейтронного излучения	не более 0,01% в сутки
--	------------------------

В ходе проведенных испытаний прототип сцинтилляционного ПЧД был проверен на соответствие следующим пунктам ПМ:

- 1) Соответствие прототипа конструкторской документации.
- 2) Эффективность регистрации нейтронов в диапазоне длин волн $(5\div 10)$ Å.
- 3) Быстродействие сцинтилляционного счетчика.
- 4) Размер активной зоны ПЧД.
- 5) Пространственное разрешение по координатам.
- 6) Коэффициент чувствительности к гамма-фону.

Прототип одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей соответствует требованиям Программы и методики испытаний и может быть использован для дальнейших разработок, а также проведения экспериментальных исследований одномерного ПЧД на 2 этапе проекта.

Результаты проведенных исследований представлены в Акте и протоколе испытаний прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей.

Проведение эксперимента для одномерного позиционно-чувствительного счетчика

В рамках проведения работ по созданию прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей был проведен исследовательский эксперимент.

Была исследована зависимость амплитуды от количества света, попавшего на сцинтиллятор, а также проверено изменение положения пика полученного сигнала в зависимости от положения источника света. В результате было установлено, что амплитуда пика меняется в зависимости от положения источника света – слева, в середине, справа. Точки в местах проведенных измерений обозначены на рис. 1.1.9.3.

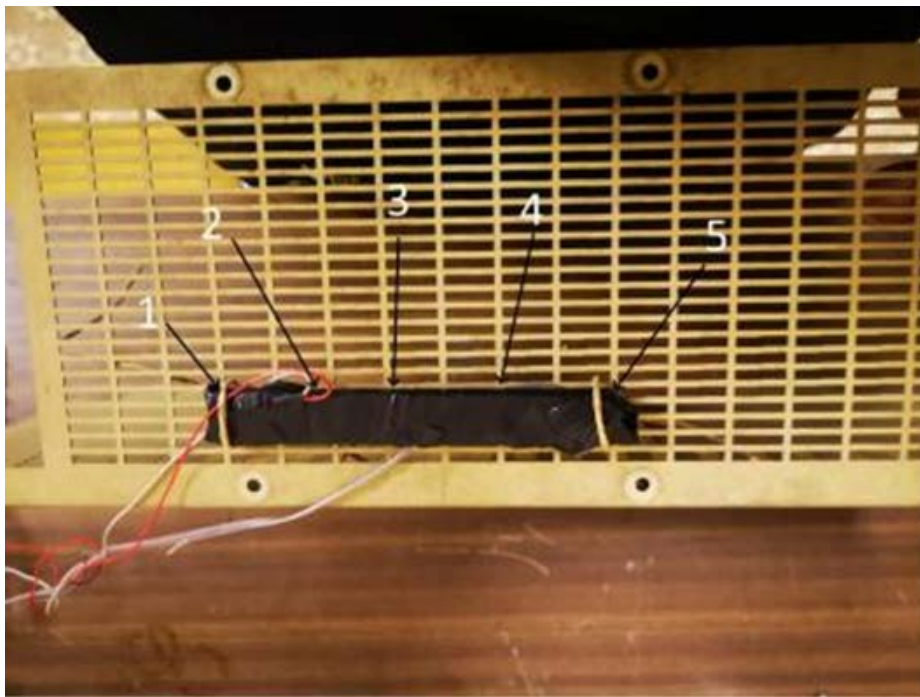


Рис. 1.1.9.3. Точки для проведенных измерений.

Прототип счетчика был подключен к независимым усилителям. Напряжение питания 33.1 В формировалось на кросс-плате. Питание кросс-платы +6В, блок питания Dazheng ps-15002dd. Для сравнения сигнала был использован осциллограф GW instek gdc-840C (250 МГц, 25Гвыб/с), который подключался к ПК по RS-232.

Осциллограф находился в ждущем режиме, триггер 1 канал (правый SiPM), порог срабатывания -18мВ (шумы детектора около 10 мВ), режим измерения – усреднение по 128 срабатываниям. Измеренные в 5 точках (рис. 1.1.9.3) сигналы представлены на рис. 1.1.9.4.

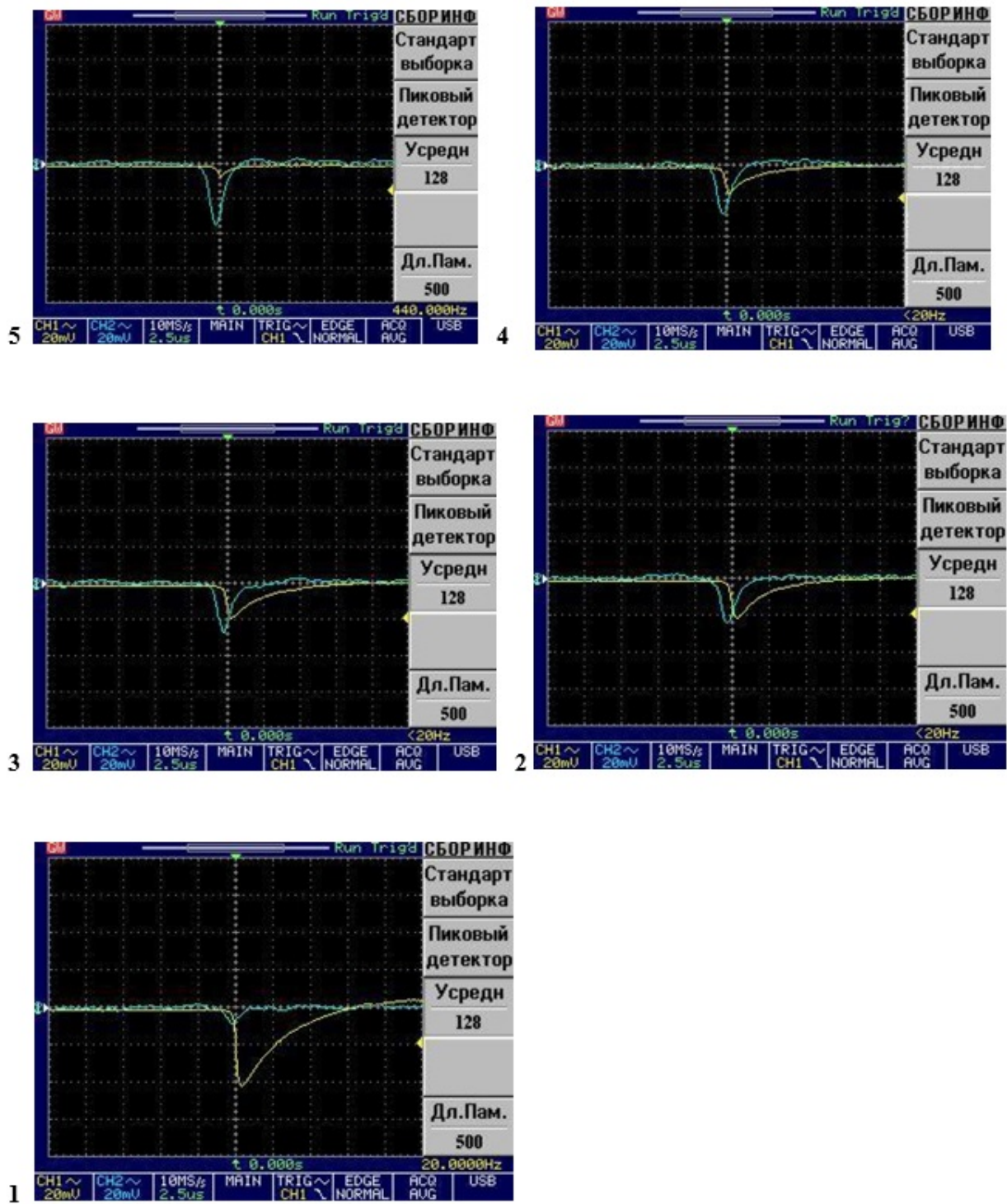


Рис. 1.1.9.4. Обозначение на рисунках соответствуют точка измерения на рисунке 1.1.9.3.

Сцинтилляционный счетчик нейтронов с размером активной зоны 120×50 мм был размещен в импровизированной защите для коллимации пучка от источника нейтронов. Ширина щели составила 10-13 мм. На рис. 1.1.9.5 представлена схема размещения элементов для проведения эксперимента.

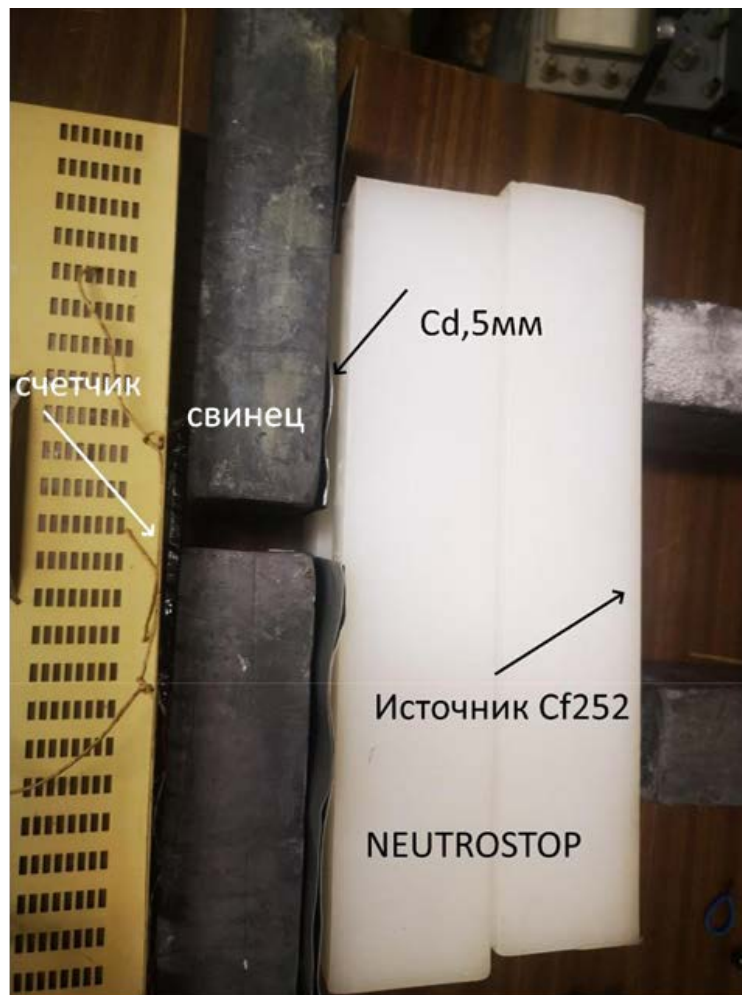


Рис. 1.1.9.5. Схема размещения элементов для проведения эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе подготовки к проведению испытаний были успешно выполнены следующие задачи:

1. Разработана конструкторская документация для изготовления прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $ZnS/{}^6LiF$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей.
2. Создан прототип одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $ZnS/{}^6LiF$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей.
3. Разработана программа и методики испытаний прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $ZnS/{}^6LiF$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей.
4. Проведены испытания прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $ZnS/{}^6LiF$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей.

Поставленные на 1 этапе проекта цели выполнены в полном объеме, в указанные сроки в соответствии с календарным планом и техническим заданием.

Объект испытаний прототип одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $ZnS/{}^6LiF$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей выдержал испытание.

Приложение.

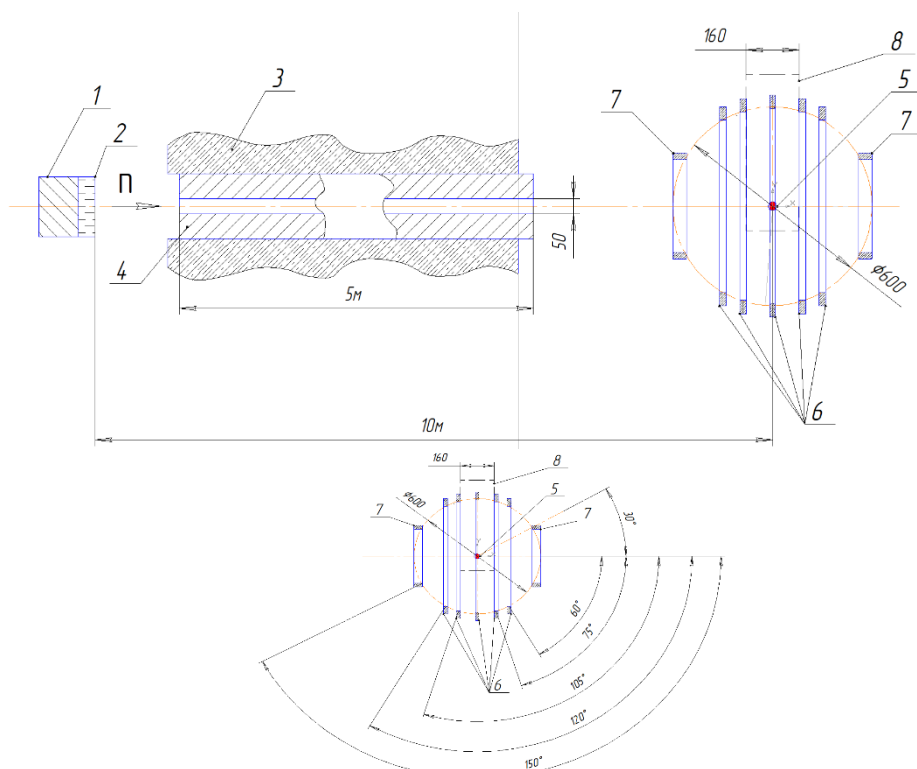
1. Конструкторская документация. Файл Прилож.1.1.9_1.pdf
2. Акт изготовления. Файл Прилож.1.1.9_2.pdf
3. Программа испытаний Файл Прилож.1.1.9_3.pdf
4. Акт и протокол испытаний Файл Прилож.1.1.9_4.pdf
5. Отчет Файл Прилож.1.1.9_5.pdf

1.1.10 Моделирование и расчет оптимальных параметров детекторов (совместно с ИЯИ РАН. Договор 400/1983 от 23.11.2021).

Нейтронная дифракция является универсальным методом исследований структуры веществ и широко применяется в таких областях как физика твердого тела, материаловедение, геология. На источниках непрерывного действия, таких как реакторы, строят дифрактометры монохроматические, а на импульсных источниках — времяпролетные. Как правило, монохроматические приборы обладают более высокой разрешающей способностью, во времяпролетные — более широким диапазоном переданных импульсов.

Целью данной работы является поиск оптимальной геометрии блока детекторов «Сфера» для нового дифрактометра, создаваемого на источнике «РАДЕКС», чтобы добиться разрешения до 2% при компактных размерах (не более 1 м³), ограниченном количестве счетчиков нейтронов (не более 200) и простоте конструкции. Эти данные необходимы для проектирования блока детекторов «Сфера» (Этап 1, пункт 1.1.15), который будет составной частью нового времяпролетного дифрактометра на импульсном источнике нейтронов «РАДЭКС».

Новый времяпролетный нейтронный дифрактометр с блоком детектирования «Сфера» планируется соорудить на импульсном источнике "РАДЭКС" на базе линейного ускорителя ИЯИ



РАН. Общий вид дифрактометра приведен на рис. 1.1.10.1.

Рисунок 1 — Общий вид дифрактометра на импульсном источнике нейтронов «РАДЭКС» (а), блок детекторов «Сфера» (б). 1— мишень, 2 — замедлитель, 3 — биологическая защита

источника, 4 — коллиматор, 5 — образец, 6 — кольцевые детекторы на углы 60-120°, 7 - кольцевые детекторы на большие и малые углы, 8 — область криостата, печи и др. устройств

Нейтроны с мишени источника 1 попадают в замедлитель 2, далее замедленные нейтроны проходят через канал в биологической защите 4, где расположен коллиматор 3. Сформированный пучок попадает на образец 5, находящийся в центре блока детекторов «Сфера». Данный блок состоит из семи кольцевых детекторов, расположенных под углами 30-150°. Сами же кольца сформированы из линейных сцинтилляционных счетчиков нейтронов, причем на двух кольцах (на максимальный и минимальный угол рассеяния) счетчики расположены так, чтобы сцинтилляторы были перпендикулярно пучку, а на остальных кольцах (на углы 60–120 град.) сцинтилляторы параллельно пучку. Кольцевые детекторы могут перемещаться по направляющим вдоль оси пучка, что позволит подстраивать разрешение дифрактометра под текущие задачи, а также даст возможность размещать образец в устройствах, таких как криостаты, печи, камеры давления и т. д.

Сцинтилляционный счетчик нейтронов

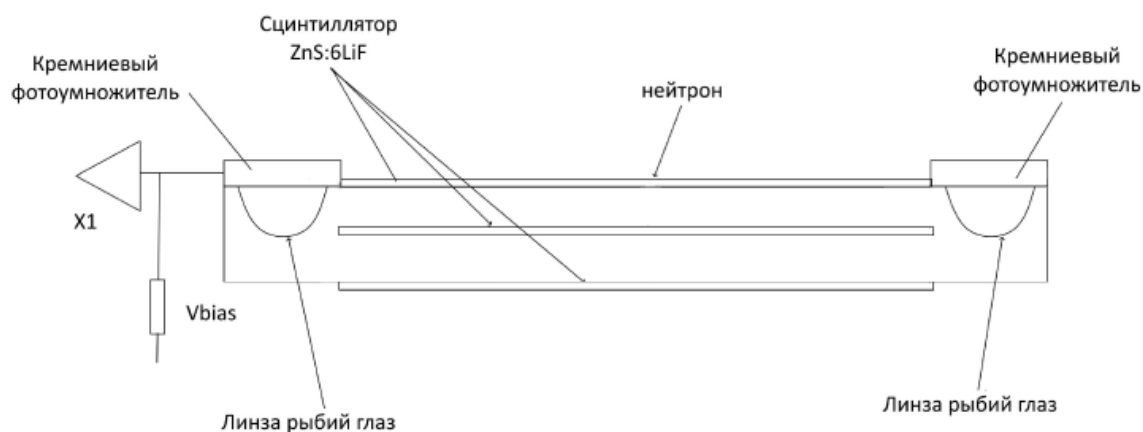


Рисунок 1.1.10.2 – блок схема сцинтилляционного детектора

Схема сцинтилляционного детектора, который применяется на нейтронографических установках ИЯИ РАН, представлена на рис. 1.1.10.2. В качестве сцинтиллятора в них используется ZnS(Ag)/LiF. Для увеличения эффективности счетчика на противоположных сторонах световода размещено по сцинтиллятору. Свет транспортируется световодом из оргстекла и регистрируется двумя твердотельными фотоумножителями. На торцах световода размещены фокусирующие линзы, которые представляют собой сферические углубления в теле световода, залитые клеем с большей оптической плотностью (“рыбий глаз”). В фокусе каждой линзы находятся твердотельные фэу (Si-PM), собирающие свет. Были изготовлены и успешно протестированы линейные детекторы (счетчики) с чувствительной областью размером 5–15 мм в ширину и 50–200 мм в длину. Возможно также создавать многослойные счетчики нейтронов, используя схему, представленную на рис. 1.1.10.2. Подобный счетчик был успешно протестирован на источнике нейтронов. Установлено, что

оптимально использовать слоя сцинтиллятора в счетчике, дальнейшее увеличение слоев не дает существенного выигрыша в эффективности.

Предварительный расчет разрешения дифрактометра

Разрешение времяпролетного дифрактометра определяется соотношением

$$\Delta d/d = \{ \tau_p^2 / (k L \lambda)^2 + (\Delta\theta_0^2 + (d/2R)^2 + (s/2R)^2) \operatorname{ctg}^2 \theta \}^{1/2} \quad (1.1.10.1)$$

где τ — длительность нейтронного импульса¹

L — пролетная база (суммарное расстояние замедлитель-образец-детектор)²

λ — длина волны нейтрона

$\Delta\theta_0$ — расходимость пучка, падающего на образец

θ — угол рассеяния

d, s — размеры (в плоскости рассеяния) детектора и образца, соответственно

R — расстояние от образца до детектора

Расходимость пучка, падающего на образец, положим равной 0,01 рад, т.к. были выбраны коллимационное расстояние 5 м и апертура 5 см (см. рис. 1.1.10.1). Длительность нейтронного импульса примем равной 90 мкс, исходя из ранее проведенных измерений на источнике РАДЭКС . Поскольку сцинтилляционные счетчики нейтронов, образующие детектор, плоские, а расположены они перпендикулярно или параллельно падающему на образец пучку, угловой размер детектора также будет зависеть от угла рассеяния. Для сцинтилляторов, расположенных параллельно оси пучка этот размер будет $d \sin 2\theta$, а для сцинтилляторов, расположенных перпендикулярно оси пучка $d \cos 2\theta$. Тогда разрешающая способность дифрактометра будет определяться соотношениями

$$\Delta d/d = \{ \tau_p^2 / (k T \lambda)^2 + (\Delta\theta^2 + (d/2R \sin 2\theta)^2 + (s/2R)^2) \operatorname{ctg}^2 \theta \}^{1/2} \quad (1.1.10.2)$$

для сцинтилляторов, расположенных параллельно оси пучка, и

$$\Delta d/d = \{ \tau_p^2 / (k T \lambda)^2 + (\Delta\theta^2 + (d/R \cos 2\theta)^2 + (s/R)^2) \operatorname{ctg}^2 \theta \}^{1/2} \quad (1.1.10.3)$$

для сцинтилляторов, расположенных перпендикулярно оси пучка.

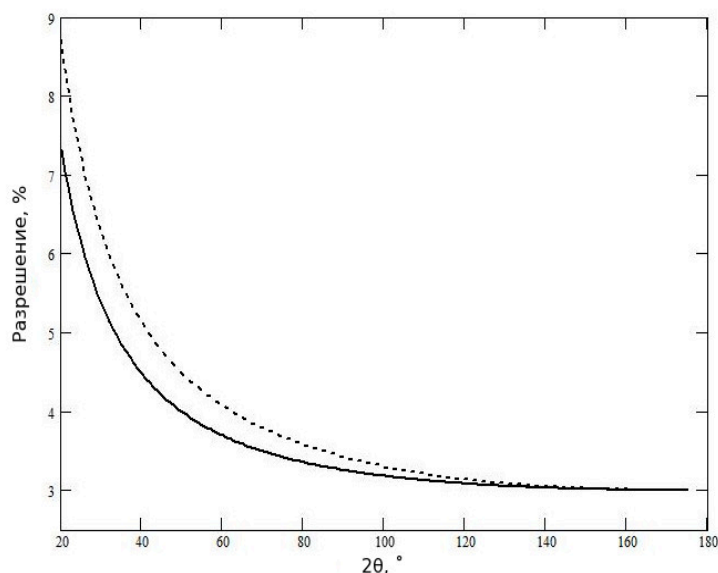


Рисунок 1.1.10.3 — Зависимость разрешения дифрактометра от угла рассеяния. Ширина детектора 5 мм (пунктир) и 10 мм (сплошная кривая). Диаметр кольца 300 мм, сцинтилляторы параллельно оси пучка. Так же были рассчитаны параметры и при другом радиусе кольца

Из рассчитанных графиков следует, что при диаметре «сферы» 300 мм, разрешение в пределах 3 % можно получить при углах больше 60° , используя счетчики нейтронов шириной 5 мм. У «сферы» диаметром 500 мм по сравнению с 300 мм выигрыш в разрешающей способности лишь 0,16% при угле рассеяния $2\theta = 90^\circ$. Таким образом выгоднее использовать счетчики шириной 5 мм при диаметре «сферы» 300 мм, это позволит увеличить разрешение и телесный угол, охватываемый детекторами, а также позволит сэкономить площадь используемых сцинтилляторов.

Моделирование

Для оптимизации разрешения и эффективности компактного кольцевого детектора на было проведено моделирование с использованием разработанной нами программы на языке Python и программного пакета VITESS.

Ввиду цилиндрической симметрии дифракционного эксперимента и конструкции детектора относительно оси пучка, на всех этапах моделирования был рассмотрен единичный сегмент — счетчик нейтронов размером 5x10 мм, образующий кольцевой детектор (рис. 1.1.10.4).

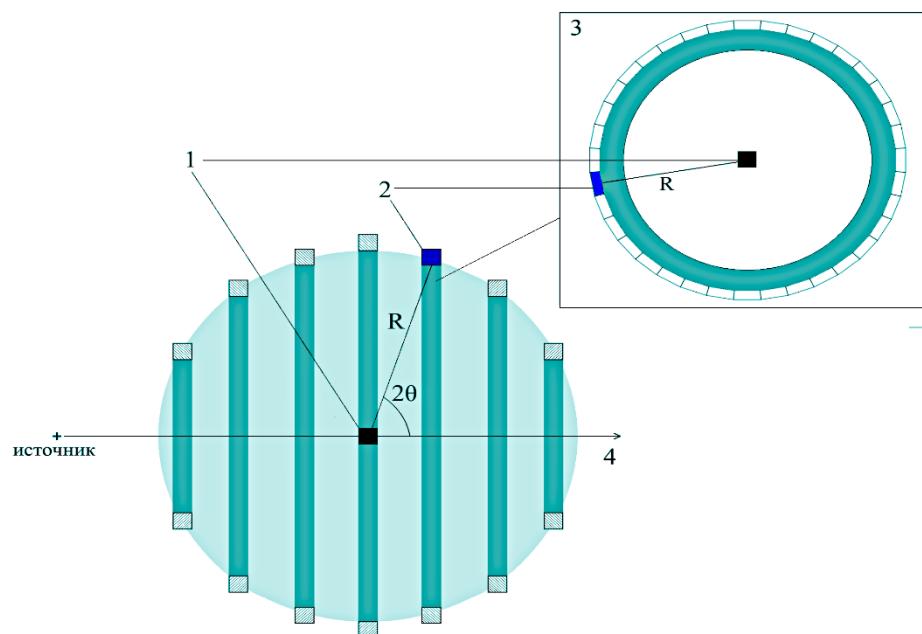


Рисунок 1.1.10.4 — Конфигурация детектора “СФЕРА”, синим цветом выделен счетчик, рассматриваемый в модели: 1 - образец, 2 - нейтронный счетчик, 3 - кольцевой детектор

Моделирование нейтронного счетчика

Целью первой серии модельных экспериментов являлось исследование функции эффективности сегмента детектора при различных конфигурациях плоскостей сцинтиллятора и угла рассеяния. Для симуляции прохождения рассеянного на образце нейтронного пучка через детектор была написана программа на языке Python, блок-схема которой приведена на рис. 1.1.10.5.

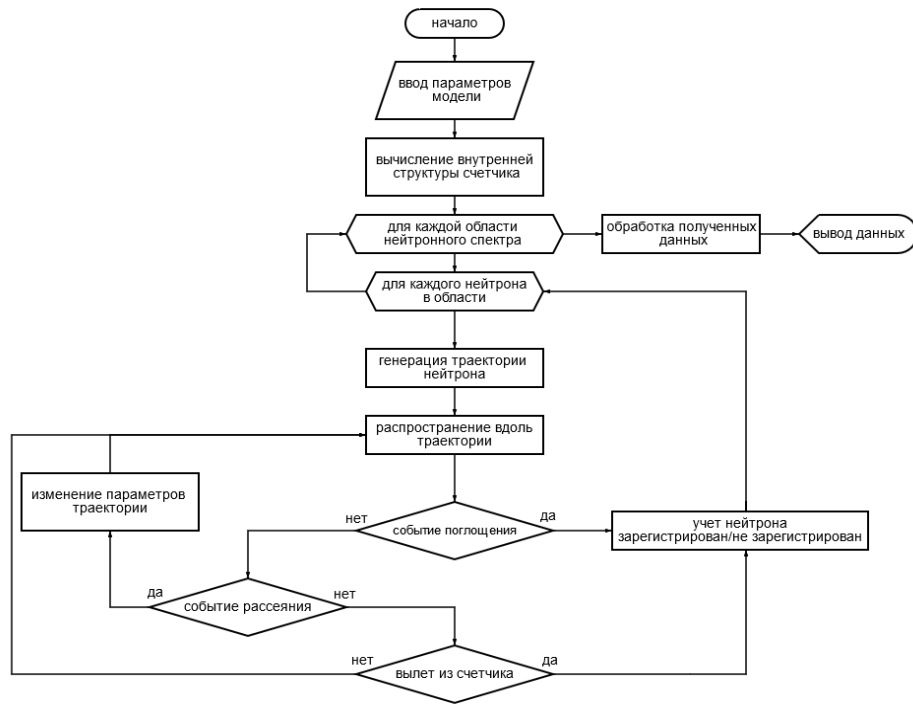


Рисунок 1.1.10.5 — Блок-схема программы на языке Python, моделирующей прохождение нейтронов через сегмент кольцевого детектора

На рисунке 1.1.10.6 представлено сечение модельного счетчика нейтронов. Три слоя сцинтилляционного материала на основе ${}^6\text{Li}$ толщиной 0.5 мм разделены двумя слоями световода из оргстекла (ПММА) толщиной 1.75 мм. Заявленная производителем эффективность регистрации тепловых нейтронов сцинтиллятором, который планируется использовать при конструировании детектора, составляет 42%. На основании этого плотность ${}^6\text{Li}$ в пластинах сцинтиллятора в рамках данной модели принята соответствующей макроскопическому сечению поглощения $10,9 \text{ см}^{-1}$. Нейтрон учитывается как зарегистрированный в случае поглощения ядом ${}^6\text{Li}$.

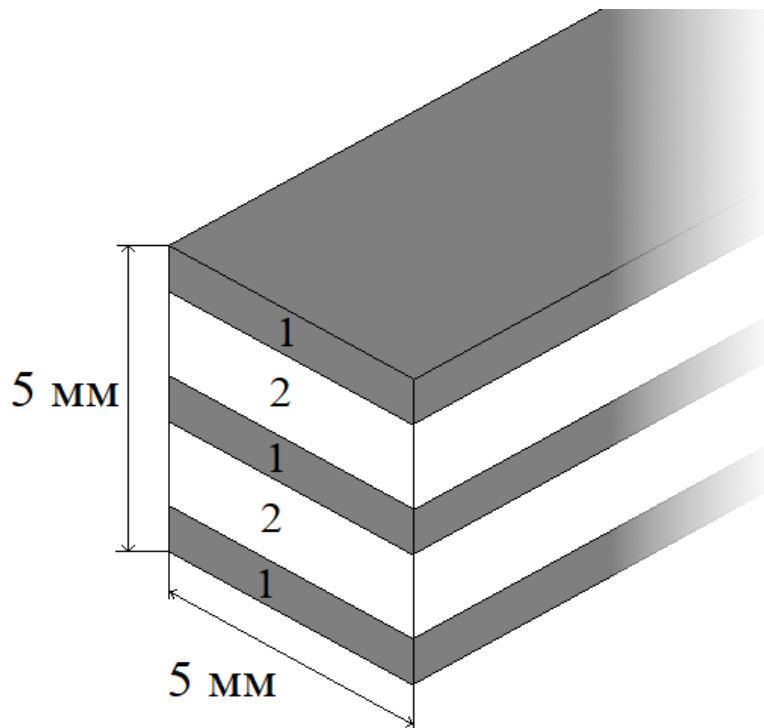


Рисунок 1.1.10.6 — Вид сечения счетчика нейтронов, рассматриваемый в модели:
 1 - слой сцинтилляционного материала ${}^6\text{Li}$, 2 - слой ПММА световода

Стоит отметить, что 8% плотности световода из ПММА составляют атомы водорода, обладающие высоким показателем сечения некогерентного рассеяния нейтронов, что приводит к искажению большинства нейтронных траекторий при прохождении через счетчик. Модель использует приближение изотропного упругого рассеяния для описания взаимодействия нейтронов с ПММА слоями счетчика. Направления рассеянных таким образом нейтронов задаются равномерно распределенными по телесному углу 4π . Чтобы получить такое распределение, задающие направление рассеянного нейтрона углы θ_1 и φ_1 определяются как

$$\varphi_1 = 2\pi \cdot a \quad (1.1.10.4)$$

$$\theta_1 = \arccos(2b - 1) \quad (1.1.10.5)$$

где a и b — псевдослучайные числа, равномерно распределенные от 0 до 1.

А компоненты (декартовых координатах) вектора скорости рассеянного нейтрона V в как

$$V_x = V \sin(\theta_1) \cos(\varphi_1) \quad (1.1.10.6)$$

$$V_y = V \sin(\theta_1) \sin(\varphi_1) \quad (1.1.10.7)$$

$$V_z = V \cos(\theta_1) \quad (1.1.10.8)$$

где V — модуль вектора скорости рассеянного нейтрона

Равномерность распределения по телесному углу для данного алгоритма можно продемонстрировать, построив точки, с координаты которых задаются (1.1.10.4)-(1.1.10.8) при одинаковом модуле V (Рис. 1.1.10.7)

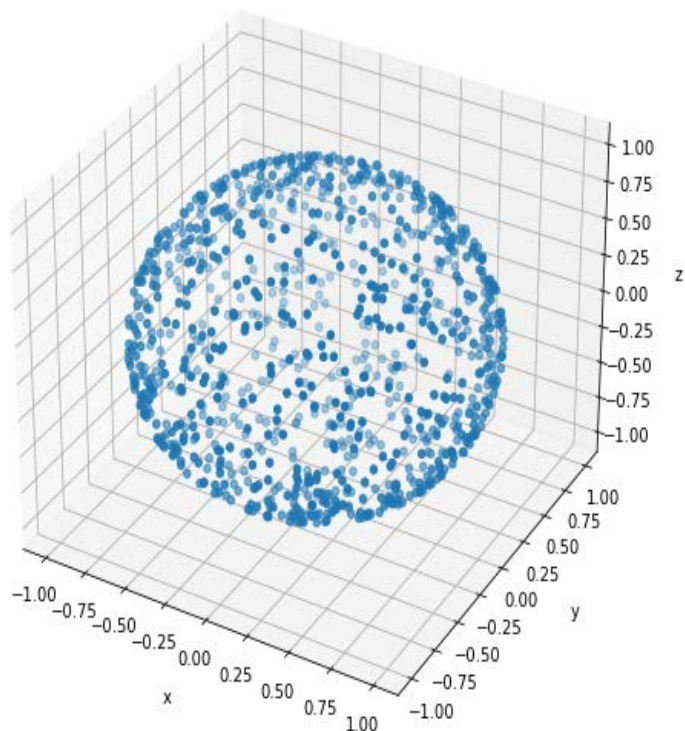
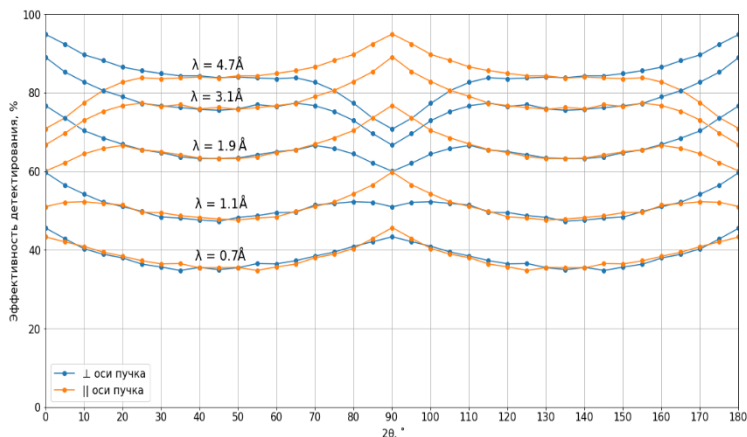


Рисунок 1.1.10.7 — Пример сгенерированного алгоритмом программы равномерного распределения векторов направлений рассеянных нейтронов. Точками обозначены концы соответствующих векторов с модулем $V = 1$

Разработанная модель учитывает два варианта расположения плоскости слоев сцинтиллятора: параллельно и перпендикулярно оси подаваемого на образец пучка нейтронов. В ходе серии симуляций проведено их детальное сравнение на длине волны нейтронов 1.9 Å (Рис. 1.1.10.8). Установлено, что ориентация плоскости счетчика оказывает заметное влияние на эффективность детектирования только при углах рассеяния 2θ близких к 0° , 90° и, соответственно, 180° . Следовательно, на больших и малых углах рассеяния имеет смысл устанавливать счетчики с



сечением, повернутым на $\pi/2$ относительно изначального.

Рисунок 1.1.10.8 — Эффективность регистрации нейтронов счетчиками с перпендикулярной и параллельной оси пучка конфигурацией плоскостей сцинтиллятора (R - расстояние образец-детектор, λ - длина волны нейтронов)

На рисунке 1.1.10.9 изображены полученные в ходе моделирования спектральные эффективности регистрации нейтронов счетчиком на различных углах рассеяния. Как видно, при углах, близких к $2\theta = 90^\circ$, вклад третьего слоя сцинтиллятора незначителен из-за упругого рассеяния на ПММА световодах распространяющихся в его направлении нейтронов обратно в предыдущие два слоя.

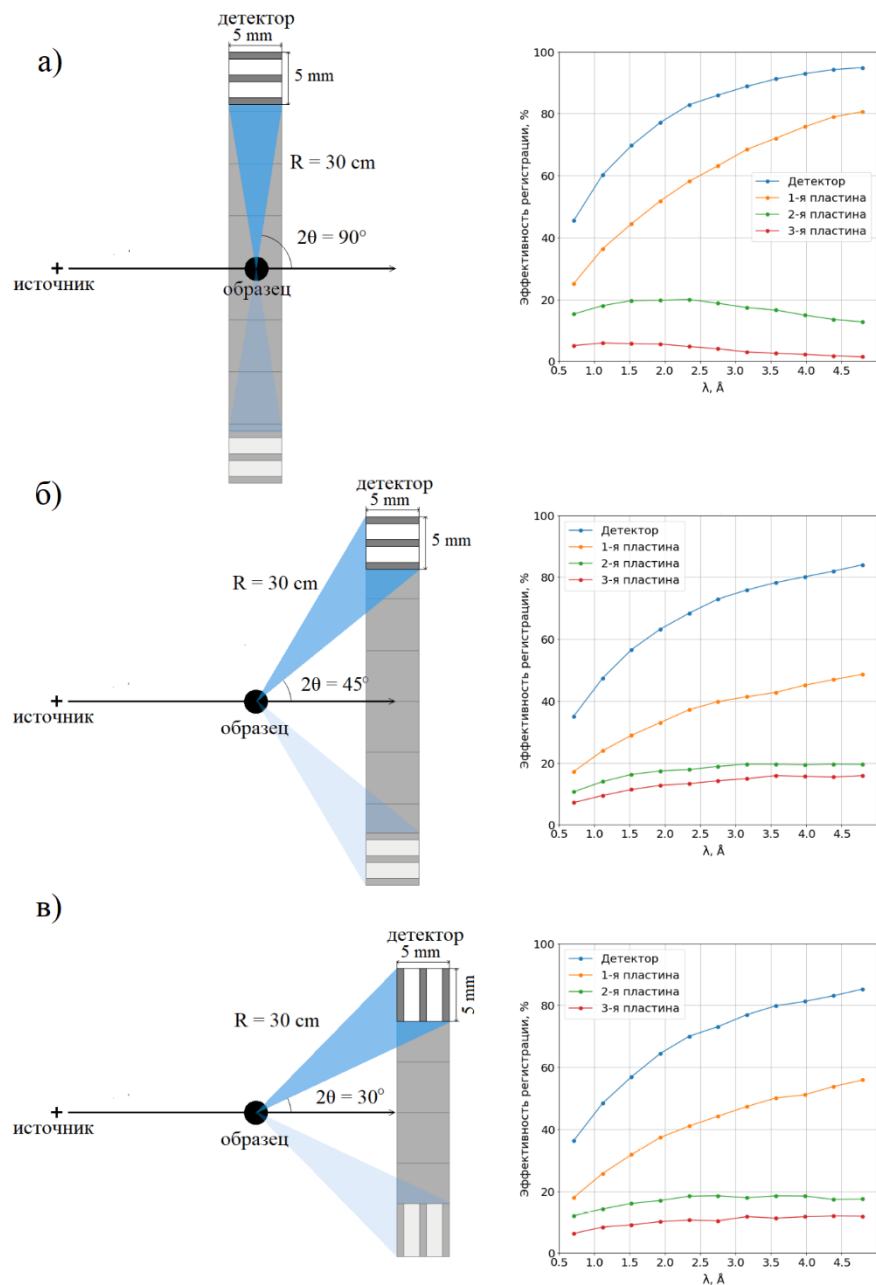


Рисунок 1.1.10.9 — Спектральная эффективность регистрации нейтронов при различных конфигурациях счетчика с двумя слоями сцинтиллятора (R - расстояние образец-детектор, 2θ - угол рассеяния)

На основании вышеперечисленных результатов, при проектировании компактного детектора нейтронов “Сфера” даны следующие рекомендации:

- ориентация сечений счетчиков, находящихся на углах рассеяния $2\theta < 20^\circ$ и $2\theta > 160^\circ$, должна соответствовать перпендикулярному расположению плоскостей детектирующих слоев относительно оси подаваемого на образец нейтронного пучка. Для остальных колец

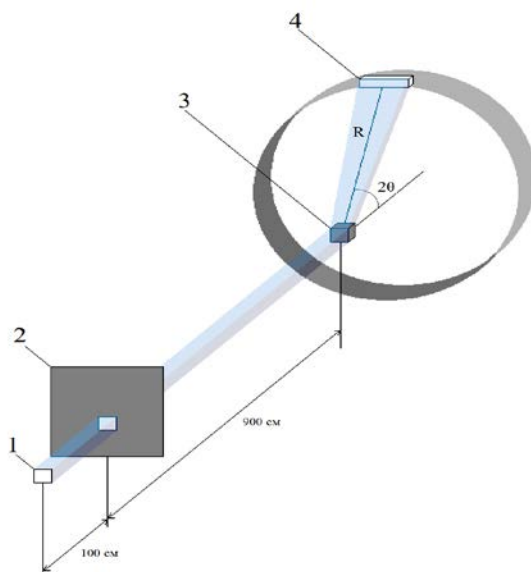
допускается ориентация параллельно оси пучка, которая также является единственной оптимальной на углах $20^\circ < 2\theta < 110^\circ$.

- независимо от угла рассеяния и ориентации нейтронного счетчика использование упрощенной двухслойной конструкции с эквивалентными габаритами негативно сказывается на его эффективности, уменьшая ее на 15–20%.

Моделирование нейтронного дифрактометра

Целью второго этапа моделирования была оценка разрешения кольцевого сегмента детектора “Сфера” в условиях дифракционного эксперимента. При проведении численного эксперимента использовался программный пакет VITESS (Virtual Instrumentation Tool for ESS), предоставляющий широкие возможности настройки конфигурации установки и мониторинга нейтронных потоков в ходе численного эксперимента: анализ спектра нейтронного пучка, его расходимости, поляризации, времени пролета и т.д. Все модули VITESS исполняются параллельно, обмениваясь данными в режиме реального времени, что дает возможность работать с большим количеством траекторий (10^{10} - 10^{12}) при ограниченных вычислительных мощностях.

Схема модели дифрактометра для численного эксперимента приведена на рис. 1.1.10.10, длина его пролетной база равна 10 м. Блок-схема модельного эксперимента приводится на рис. 1.1.10.11. Для экономии вычислительных ресурсов моделирование было разделено на два условных этапа. В ходе первого этапа источник производит сколлимированный нейтронный пучок, подаваемый затем на образец для вычисления трехмерной дифракционной картины, которая записывается в виде файла с таблицей нейтронных траекторий. Второй этап составляет серия экспериментов по регистрации рассеянных образцом нейтронов при различных углах рассеяния 2θ . Данные эксперименты используют сохраненные в файле траектории как входные данные, что



позволяет проводить вычисления для различных конфигураций детектора без необходимости повторной симуляции процесса рассеяния нейтронного пучка на образце.

Рисунок 1.1.10.10 — Схема модельного дифрактометра, реализованного при помощи программного пакета VITESS: 1 - поверхность замедлителя нейтронов (1x1 см), 2 - коллимирующая щель (1x1 см), 3 - поликристаллический образец, 4 - нейтронный счетчик кольцевого сегмента детектора

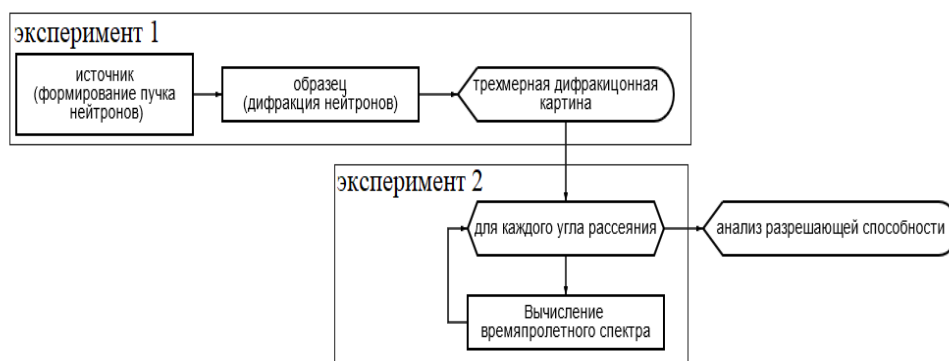


Рисунок 1.1.10.11 — Блок-схема методики модельного эксперимента по дифракции нейтронов, проведенного при помощи программного пакета VITESS

Спектральные и временные характеристики модельного источника нейтронов соответствуют раннее измеренному спектру источника “РАДЭКС” ИЯИ РАН . Были рассмотрены нейтроны с длиной волны $\lambda < 2.1 \text{ \AA}$ при частоте импульсов источника 50 Гц. При этом программный модуль источника выступает также как коллиматор пучка, генерируя траектории нейтронов, выходящие с поверхности плоского замедлителя (профиль 1x1 см) и проходящие через направляющее окно (профиль 1x1 см), расположенное на расстоянии 100 см от поверхности. Полученный пучок проходит оставшуюся часть пролетной базы и рассеивается на образце, в качестве которого использован кубический (1x1x1 см) поликристаллический алмаз (карбонадо). Рассеянные образцом нейтроны, попадают затем в линейный счетчик нейтронов, который является сегментом кольцевого детектора, находящийся на расстоянии R от образца. Зарегистрированные счетчиком нейтроны составляют времяпролетный спектр, соответствующий выбранному углу рассеяния. Для модели были выбраны углы рассеяния $2\theta = 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ$. На рисунке 1.1.10.12 приведен пример полученных спектров Оценка разрешения дифрактометра $\Delta d/d$ при выбранном угле производится за счет измерения ширины на полувысоте брэгговских пиков на модельных времяпролетных спектрах:

$$\Delta d/d = \Delta t/t \quad (1.1.10.9)$$

где Δt - ширина пика на полувысоте,
 t - положение пика на времяпролетном спектре.

На рисунке 1.1.10.13 приведена зависимость разрешающей способности сегмента кольцевого детектора (счетчика), а значит и кольцевого детектора от угла рассеяния нейтронов с образца.

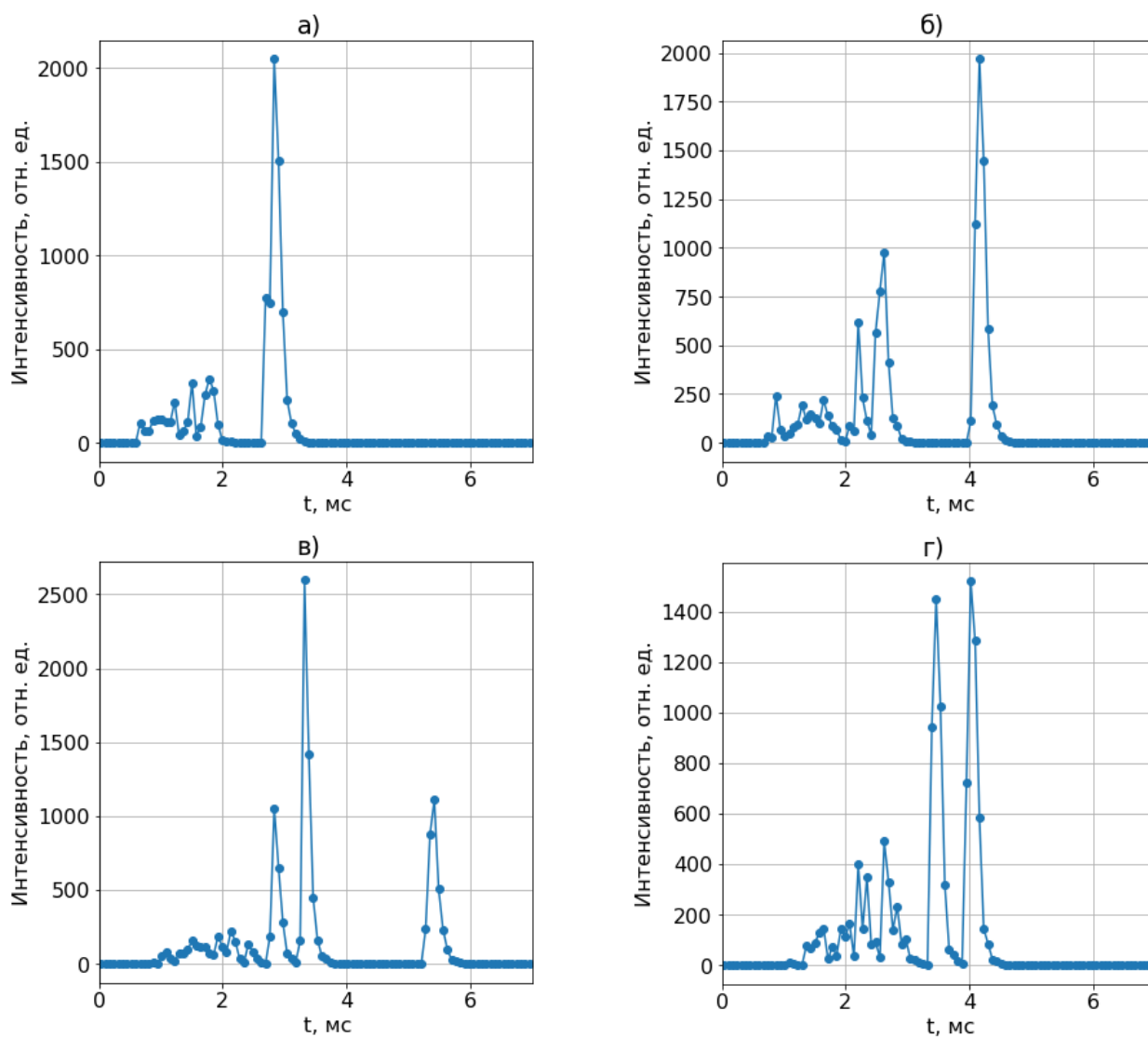


Рисунок 1.1.10.12 — Модельные времяпролетные спектры нейтронов, рассеянных под углами
 а) - 30°, б) - 45°, в) - 60°, г) — 75°

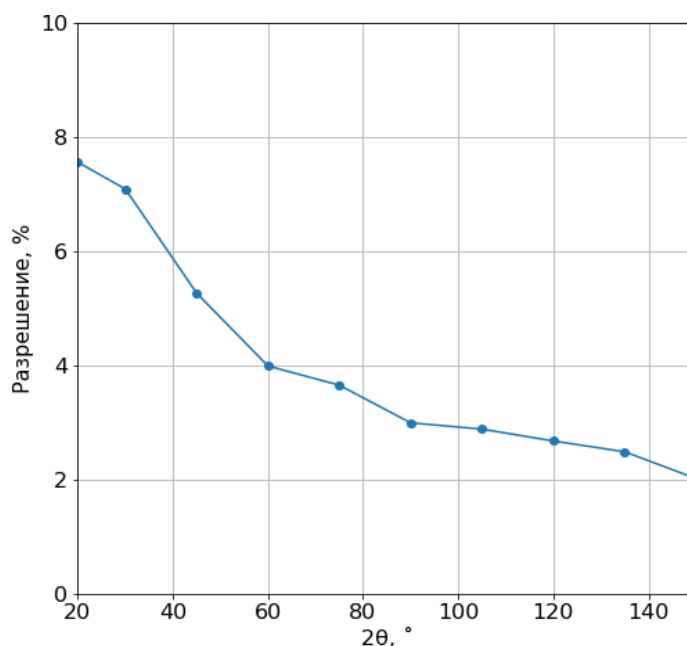


Рисунок 1.1.10.13 — Разрешающая способность нейтронного счетчика как функция угла рассеяния ($30^\circ < 2\theta < 150^\circ$)

Как видно из рис. 1.1.10.13, разрешающая способность детектора в дифракционном эксперименте на источнике “РАДЭКС” варьируется от 2.0% до 7.6% в зависимости от угла рассеяния регистрируемых нейтронов. Ввиду значительной потери разрешения на малых углах, в данной работе для счетчиков на угле рассеяния 30° были рассмотрены два подхода, позволяющие частично компенсировать снижение разрешающей способности.

Первым вариантом является установка коллимирующей щели вокруг каждого сцинтилляционного счетчика (ширина 5 мм), что снизит угловую расходимость регистрируемого пучка. Однако, как показали результаты моделирования, этот способ не дает существенного выигрыша в разрешении, при том, что количество зарегистрированных нейтронов существенно снижается из-за коллимации. Это связано, прежде всего с тем, что одиночная коллимирующая щель не уменьшает угловых размеров образца в поле видимости счетчика.

Вторым вариантом является увеличение расстояния образец-детектор, что возможно благодаря подвижной конструкции кольцевых модулей блока детекторов - в этом случае уменьшаются угловые размеры как счетчика, так и образца. На рисунке 1.1.10.28 приведен пример конфигурации детектора, в которой кольцевой детектор, регистрирующий рассеяние под углом 30° вынесен за исходную сферическую поверхность ($R1 = 30$ см), образуя “конус” повышенного разрешения на расстоянии $R2 = 50$ см от образца. Модельный спектр, полученный в такой конфигурации, как и в стандартной, приведен на рис. 1.1.10.29. В этом случае уширение пиков времяпролетного спектра уменьшается на 1%, позволяя добиться разрешающей способности в 6.6%.

Следует добавить, что для получения данной конфигурации не требуется изменение конструкции блока детекторов «Сфера», нужно лишь сдвинуть кольцевые детекторы по направляющим.

Заключение

Были проведены модельные эксперименты, которые позволили изучить разрешающую способность нового времяпролетного дифрактометра на импульсном источнике «РАДЭКС» с блоком детекторов «Сфера» в различных предполагаемых конфигурациях. Также была проанализирована эффективность (в зависимости от длины волны и углов падения нейтронов) новых сцинтилляционных детекторов, разработанных в ИЯИ РАН для блока детекторов «Сфера».

В результате моделирования было установлено, что разрешающая способность детектора в дифракционном эксперименте на источнике «РАДЭКС» уменьшается от 2% до 10% при увеличении угла рассеяния нейтронов образцом от 150 до 30 градусов.

Основные рекомендации для проектирования блока детекторов «Сфера», выработанные на основе полученных результатов:

- Следует использовать трехслойные детекторы при любых углах рассеяния для увеличения эффективности регистрации нейтронов.

- Оптимальный радиус сферы – 300 мм. При ширине счетчиков нейтронов 5 мм это позволит сэкономить дорогостоящий материал сцинтиллятора.

- Оптимальная ширина счетчиков нейтронов, образующих кольцевые детекторы, составляет 5 мм, однако на углах рассеяния больше 150° могут использоваться также счетчики шириной до 12 мм.

- Боковые поверхности (ребра) счетчиков могут не закрываться поглощающими нейтроны материалами (например кадмием), т.к. это практически не влияет на разрешение.

- Для достижения максимальной эффективности ориентация счетчиков нейтронов, находящихся на углах рассеяния $2\theta < 20^\circ$ и $2\theta > 160^\circ$, должна соответствовать перпендикулярному расположению плоскостей детектирующих слоев относительно оси подаваемого на образец нейтронного пучка. Для остальных колец допускается ориентация параллельно оси пучка, которая также является оптимальной при углах $20^\circ < 2\theta < 110^\circ$.

- При углах рассеяния менее 30° следует увеличить расстояние образец-детектор до 500 мм чтобы улучшить разрешение.

Приложения

1. Отчет о результатах моделирования и расчета оптимальных параметров детекторов. Файл Прилож.1.1.10.pdf

1.1.11 Изготовление кольцевого детектора нейтронов для дифрактометра «СФЕРА» (1 часть) (совместно с ИЯИ РАН. Договор 400/1983 от 23.11.2021).

Одной из самой главной части любого дифрактометра являются детекторы, именно они определяют эффективность регистрации излучения. Исходя из результатов моделирования дифрактометра «СФЕРА» оптимальным по соотношению цена-эффективность является использование 3-слойных сцинтилляционных детекторов.

В соответствии с этим был разработан детектор нейтронов на основе 3-х слоев сцинтиллятора, органического световода и 2-х кремниевых фотоумножителей. Общий принцип создания детектора показан на рисунке 1.1.11.1. Слои детектора расположены поочередно сцинтиллятор-световод. По краям световода расположены линзы типа рыбий глаз. В качестве сцинтиллятора мы использовали $ZnS:6LiF(Ag)$ фирмы Saint Gobain эффективностью 42%.

Общий принцип создания детектора показан на рисунке 1.1.11.1. Слои детектора расположены поочередно сцинтиллятор-световод.

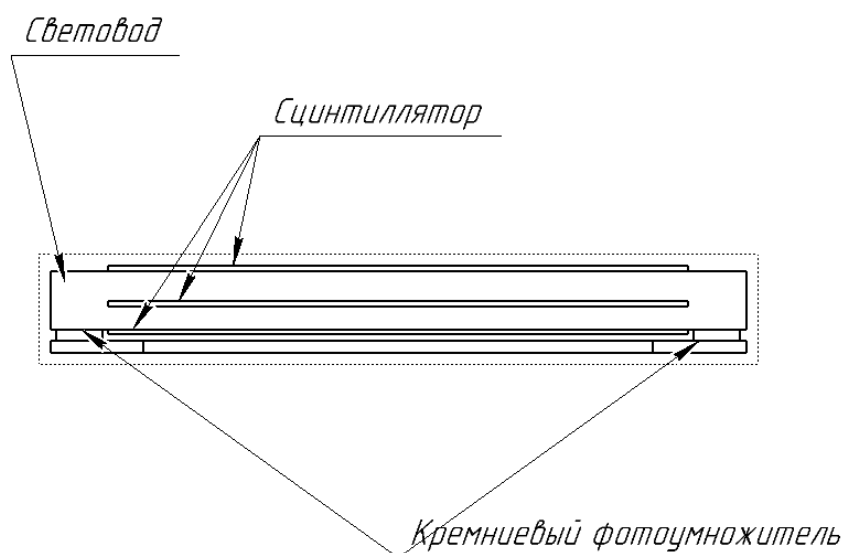


Рисунок 1.1.11.1, принцип построения детектора

Для изготовления световода и резка сцинтиллятора использовался станок для лазерной резки Raylogic 6040 v12c трубкой Reci мощностью 100 ватт.

Для световода использовался PLEXIGLAS XT толщиной 5мм, из которого вырезался световод размером 5x4x60мм с вырезом по центру световода 0.5x50мм для 3го слоя сцинтиллятора. После изготовления заготовки производилось изготовление линзы типа «рыбий глаз» фрезерный станком с шаровой фрезой диаметром 4мм. Внешний вид световода представлен на рисунке 1.1.11.2.



Рисунок 1.1.11.2. Внешний вид

Резка сцинтиллятора производилась так же на станке лазерной резки с последующим скрайбированием. Связано это с особенностями материала, т. к. резка на полную глубину дает почернения краев что негативно может сказаться на эффективности детектора. Резка была проведена на глубину примерно 80% что не приводило к обугливанию, в дальнейшем заготовки легко отделялись при производстве процесса поклейки. Внешний вид сцинтилляторов представлен на рисунке 1.1.11.3.



Рисунок 1.1.11.3 – внешний вид сцинтиллятора.

Всего было изготовлено 150 световодов и 450 пластин сцинтиллятора что при сборке соответствует 150 3-слойных сцинтилляционных детекторов нейтронов.

Приложения

1. Акт изготовления элементов дифрактометра «СФЕРА». Файл Прилож.1.1.11.pdf

1.1.12 Синтез, структурная и магнитная характеристика тонких пленок и планарных наноструктур на основе гадолиния (совместно с ИФМ УО РАН. Договор 400/1979 от 22.11.2021)

Сверхрешётки являются искусственным, синтезируемым материалом, и поэтому тщательная отработка методики приготовления экспериментальных образцов является необходимым условием для проведения дальнейших исследований физических свойств. Особенность изготовления наноструктур состоит в том, что характеристики материала задаются не только структурной формулой, но также определяются технологическими особенностями используемой напылительной системы. Однако, количественные значения характеристик образца могут быть существенно улучшены выбором оптимальных именно для данной напылительной системы условий приготовления (давления рабочего газа, температуры и шероховатости подложки, мощности магнетронного разряда, режима ионной очистки поверхности, предваряющей процесс напыления и т. д.). Для дальнейшей оптимизации характеристик сверхрешётки необходимо проанализировать зависимости от толщины слоев для того, чтобы выбрать определенное сочетание толщин магнитных и немагнитных слоев и оптимальные для данной напылительной системы режимы приготовления наноструктуры. В результате исследования различных режимов напыления были выбраны следующие условия изготовления образцов: продолжительность ионной очистки поверхности подложки перед напылением – 10 мин. при мощности магнетрона переменного тока – 100 W; мощность магнетронов постоянного тока при напылении – 100 W; рабочее давление аргона – 0.1 Па при скорости натекания 22 мл/мин.; температура подложки – (298-300) K; частота вращения подложки – 10 об./мин.

Номинальные толщины определялись путем калибровки скорости напыления с помощью оптического профилометра-интерферометра белого света Zygo NewView 7300. После изготовления образцов толщины были уточнены при помощи рентгеновских методов.

Серия сверхрешёток: $\text{Cr}(50 \text{ \AA})/[\text{Fe}(35 \text{ \AA})/\text{Cr}(t, \text{ \AA})/\text{Gd}(50 \text{ \AA})/\text{Cr}(t, \text{ \AA})]_{12}/\text{Cr}(30 \text{ \AA})$, $t = 0 - 60 \text{ \AA}$ (Таблица 1.1.12.1) была выращена на подложках Si с кристаллической ориентацией (001). Буферный слой Cr был напылен для “сглаживания” разницы в постоянных решетках между подложкой и основной пленкой Fe/Cr/Gd. Данный слой оказался достаточным как для релаксации напряжений, вызванных различием в постоянных решетки, так и для сглаживания шероховатости подложки, которая, согласно данным производителя, составляла несколько ангстрем. Образцы пронумерованы и расположены в Таблице 1.1.12.1 в порядке увеличения толщины прослойки Cr.

№	Формулы образцов
1	$\text{Cr}(50 \text{ \AA})/[\text{Fe}(35 \text{ \AA})/\text{Gd}(50 \text{ \AA})]_{12}/\text{Cr}(30 \text{ \AA})$

2	Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr(15 Å)/Gd(50 Å)/Cr(15 Å)] ₁₂ /Cr(30 Å)
3	Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr(20 Å)/Gd(50 Å)/Cr(20 Å)] ₁₂ /Cr(30 Å)
4	Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr(43 Å)/Gd(50 Å)/Cr(46 Å)] ₁₂ /Cr(30 Å)
5	Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr(60 Å)/Gd(50 Å)/Cr(60 Å)] ₁₂ /Cr(30 Å)
6	Cr(50 Å)/Gd(600 Å)/Cr(30 Å)
7	Cr(100Å)/Gd(600Å)/Nb(300Å)

Таблица 1.1.12.1. Список тонких пленок и планарных наноструктур на основе гадолиния, синтезированных за время выполнения проекта. В приведенных формулах указаны номинальные толщины слоев.

Рентгеноструктурный анализ проводился с использованием лабораторного дифрактометра Panalytical Empyrean Series 2. Эксперименты проводились в излучении от медной и хромовой рентгеновских трубок. Для формирования параллельного пучка на первичном пучке использовался гибридный монохроматор, состоящий из параболического зеркала на основе сверхрешетки W/Si и двухкристального (220)Ge монохроматора. Высота пучка, ограниченного щелью, составляла 0.08 мм. На вторичном пучке использовался плоскопараллельный коллиматор с плоским графитовым монохроматором и коллимирующей щелью с экваториальной апертурой 0.1 мм.

Качество межслойных границ приготовленных наноструктур оценивалось при помощи рентгеновской рефлектометрии. На Рисунках 1.1.12.1 – 1.1.12.3 представлены экспериментальные данные для трех образцов. Все рефлектограммы были обработаны в коммерческой программе X-Pert Reflectivity, которая была предоставлена фирмой-производителем прибора. В Таблицах 1.1.12.2-1.1.12.4 приведены параметры, полученные при подгонке кривых рентгеновской рефлектометрии для пяти образцов.

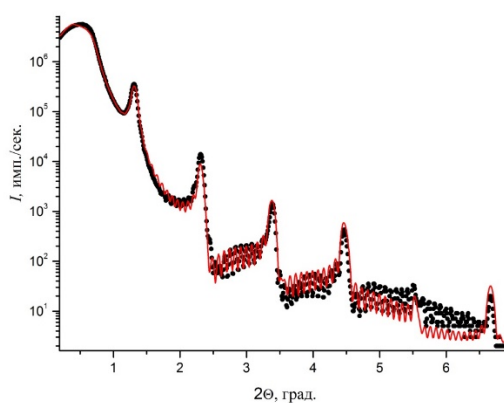


Рисунок 1.1.12.1. Экспериментальные данные (символы) и результат обработки (линия) рентгеновской рефлектометрии для сверхрешётки Fe/Gd (образец №1).

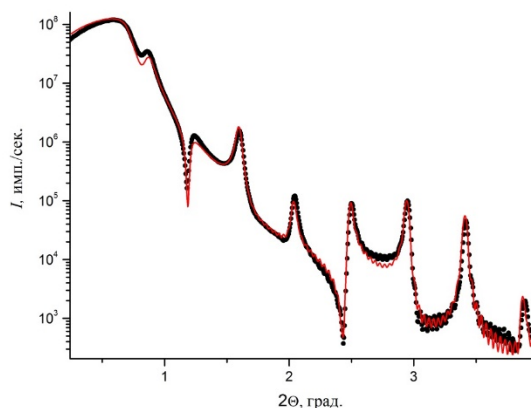


Рисунок 1.1.12.2. Экспериментальные данные (символы) и результат обработки (линия) рентгеновской рефлектометрии для сверхрешётки Fe/Cr(60 Å)/Gd (образец № 5).

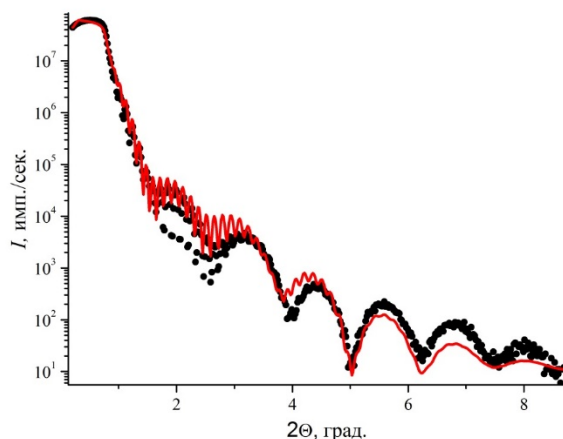


Рисунок 1.1.12.3. Экспериментальные данные (символы) и результат обработки (линия) рентгеновской рефлектометрии для плёнки Gd(600 Å) (образец № 6).

Наличие выраженных кессиговских осцилляций свидетельствует о малой шероховатости интерфейсов слоистой структуры. При обработке предполагалось, что верхний слой Cr после извлечения образца из ростовой камеры на воздух до постановки его в дифрактометр, частично окисляется, образуя оксидную пленку Cr_2O_3 , толщина которой составляет от 10 до 19 Å (7 колонка Таблицы 1.1.12.1). В таблице 1.1.12.2 представлены значения реальных толщин каждого слоя серии сверхрешеток Fe/Cr/Gd.

№ образца	t(буфер), Å	t(Fe), Å	t(Cr), Å	t(Gd), Å	t(крышка), Å	t(Cr ₂ O ₃), Å
1	48.6	31.9	-	47.9	20.6	17.3
2	47.8	33.4	13.4	46.9	16.8	19.2
3	48.3	33.7	17.9	47.6	18.1	18.6
4	46.5	33.4	41.8	48.5	12.9	17.8
5	48.1	31.8	54.8	45.0	18.2	10.1
6	49.0	-	-	571.0	7.0	6.0
7	96	-	-	583.0	65.0	16.0

Таблица 1.1.12.2. Значения толщин слоев для всех образцов серии, определенные из анализа кривых рентгеновской рефлектометрии.

Прежде всего, отметим некоторый разброс по толщине слоёв у разных образцов. Различия толщин слоев Fe и Gd исследованных сверхрешёток большей частью находятся в пределах 7 %, носят случайный характер, и, по-видимому, являются следствием неизбежных отклонений условий роста различных образцов серии. Также стоит отметить, что фактическая толщина слоёв Cr отличалась от номинальной толщины на 4 - 12 %, чем тоньше слой, тем отличие больше. Причиной отличия номинальной толщины от реальной также может являться систематическая ошибка при калибровке на профилемере.

В таблице 1.1.12.3 представлены значения среднеквадратичной шероховатости интерфейсов серии сверхрешеток Fe/Cr/Gd. Согласно результатам обработки, среднеквадратичная шероховатость подложки составляет 5 - 10 Å. Из приведенной таблицы видно, что характеристики интерфейсов Fe/Cr, Cr/Fe и Gd/Cr, Cr/Gd отличаются, причем во всех случаях межслойные шероховатости на границе Cr/Fe и Cr/Gd больше, т.е. $\sigma(\text{Cr/Fe}) > \sigma(\text{Fe/Cr})$ и $\sigma(\text{Cr/Gd}) > \sigma(\text{Gd/Cr})$. Возможно, шероховатость межслойных границ Cr/Fe и Cr/Gd обусловлена несовершенством поверхности слоя Cr. Скорее всего, после формирования на поверхности слоя Fe (Gd) первого слоя Cr последующий рост Cr происходит в виде островков, и как следствие этого, возможны значительные флуктуации толщин слоев Cr. Самое больше значение среднеквадратичной шероховатости на образовавшемся оксиде хрома 7.4 - 16.2 Å. Так как межслойная шероховатость на границах Fe/Cr, Cr/Fe и Gd/Cr, Cr/Gd составляет 3.1 – 6.7 Å, то можно предположить, что слой хрома неоднороден, и возможны прорастания через прослойку, т.е. Fe и Gd имеет прямое обменное взаимодействие.

В таблице 1.1.12.4 представлены значения плотности отдельных слоев сверхрешеток серии Fe/Cr/Gd, определенных из анализа рефлектограмм. Атомные плотности в слоях приблизительно

равны плотностям объемных материалов (Таблица 1.1.12.4). Так, для элементов изменение плотности составило 2 - 9.5%, в то время как для Cr₂O₃ - 19%.

№ образца	$\sigma(\text{Si}), \text{Å}$	$\sigma(\text{буфер}), \text{Å}$	$\sigma(\text{Fe}), \text{Å}$	$\sigma(\text{Cr}), \text{Å}$	$\sigma(\text{Gd}), \text{Å}$	$\sigma(\text{Cr}), \text{Å}$	$\sigma(\text{крышка}), \text{Å}$	$\sigma(\text{Cr}_2\text{O}_3), \text{Å}$
1	9.3	6.5	4.9	-	4.7	6.4	6.4	8.4
2	8.1	6.2	4.6	3.8	5.1	5.3	8.1	9.4
3	7.3	7.5	4.4	4.2	5.3	5.7	6.9	8.1
4	4.8	5.8	4.2	4.1	5.1	4.6	15.0	7.4
5	9.1	6.8	6.7	4.0	5.1	4.1	7.9	9.8
6	11	7			3		7	6
7	10	5			5		6	8

Таблица 1.1.12.3. Среднеквадратичные шероховатости межслойных границ для всех образцов серии, определенные из анализа кривых рентгеновской рефлектометрии.

№ образца	$\rho(\text{Si}), \text{г/см}^3$	$\rho(\text{Cr}^{\text{буфер}}), \text{г/см}^3$	$\rho(\text{Fe}), \text{г/см}^3$	$\rho(\text{Cr}), \text{г/см}^3$	$\rho(\text{Gd}), \text{г/см}^3$	$\rho(\text{Cr}), \text{г/см}^3$	$\rho(\text{Cr}_2\text{O}_3), \text{г/см}^3$
1	2.6	7.2	8.0	-	7.7	6.9	4.4
2	2.8	6.1	7.2	6.3	7.3	6.4	5.4
3	2.4	6.9	7.9	6.5	7.8	6.5	4.8
4	2.6	7.2	7.8	7.2	7.4	6.8	4.6
5	2.8	6.5	7.8	7.3	7.6	6.7	4.7
6	2.8	7.9	7.8	7.0	7.3	6.9	3.9
объемный материал	2.3	7.2	7.9	7.2	7.9	7.2	5.2

Таблица 1.1.12. 4. Плотности слоев для всех образцов серии, определенные из анализа кривых рентгеновской рефлектометрии.

Таким образом, согласно структурной аттестации, образцы имеют слоистую структуру со строго определенной периодичностью, резкие межслойные границы со среднеквадратичной амплитудой шероховатостей $\sigma = 4 - 9 \text{ Å}$. Наибольшее значение σ соответствует границам раздела из слоя хрома

в слой железа и гадолиния по сравнению с границами раздела из слоёв железа и гадолиния в слой хрома.

Низкотемпературные магнитные измерения проводились на СКВИД – магнетометре в магнитном поле 500 Э. Образцы (с прослойкой хрома $t_{Cr}=15 - 60 \text{ \AA}$) характеризуются монотонно убывающей температурной зависимостью намагниченности. На Рисунке 1.1.12.4 представлены температурные зависимости намагниченности для образцов № 2 - 5.

Дополнительные магнитные измерения (полевые зависимости) проводились при комнатной температуре на лабораторном вибрационном магнитометре АВМ-1. Магнитное поле прикладывалось в плоскости образца. На Рисунке 1.1.12.5 представлены зависимости магнитного момента на единицу площади от индукции приложенного магнитного поля. Из анализа петель гистерезиса, измеренных при комнатной температуре (Рисунок 1.1.12.5), следует, что суммарная намагниченность образцов меньше намагниченности объемного Fe данной толщины ($M=5.98 \cdot 10^{-4} \text{ emu/cm}^2$). Из этого следует, что-либо магнитный момент в слоях Fe уменьшается по сравнению с объемным материалом, либо в слоях Gd при $T=300 \text{ K}$ (выше $T_C=293 \text{ K}$ объемного Gd) формируется магнитный момент, который противоположно направлен относительно намагниченности слоев железа.

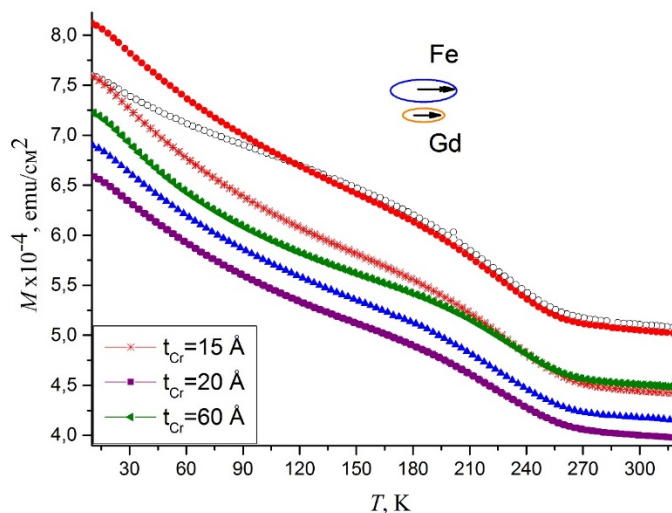


Рисунок 1.1.12.4. Зависимости намагниченности от температуры для образцов № 2 – 5: Fe/Cr(15Å)/Gd, Fe/Cr(20 Å)/Gd, Fe/Cr(60 Å)/Gd, измеренные при $H=500 \text{ Э}$.

Для всех образцов выше температуры 250 К величина намагниченности выходит на постоянное значение, что очевидно связано с переходом основного объема слоев Gd в парамагнитную фазу. При

этом величина остаточной намагниченности обусловлена магнитным моментом слоев Fe. Для образцов при $t_{Cr} > 8.6 \text{ \AA}$ (Рисунок 1.1.12.4) величина намагниченности с ростом температуры монотонно убывает, что свидетельствует об уменьшении намагниченности в слоях Gd. Намагниченность слоёв Gd и Fe при этом ориентированы по направлению внешнего магнитного поля. Такое поведение свидетельствует о малости (или отсутствии) межслойного обменного взаимодействия и, как следствие, о ферромагнитном упорядочении магнитных моментов слоев Fe и Gd в приложенном магнитном поле. Величина намагниченности слабо меняется с увеличением толщины прослойки.

Петли гистерезиса для двух образцов с $t_{Cr}=20 \text{ \AA}$ и $t_{Cr}=15 \text{ \AA}$ (представленные на Рисунке 1.1.12.5) практически совпадают. Их форма качественно может быть объяснена независимым переманчиванием слоев Fe и Gd, что не позволяет говорить о каком-либо проявлении межслойного обменного взаимодействия.

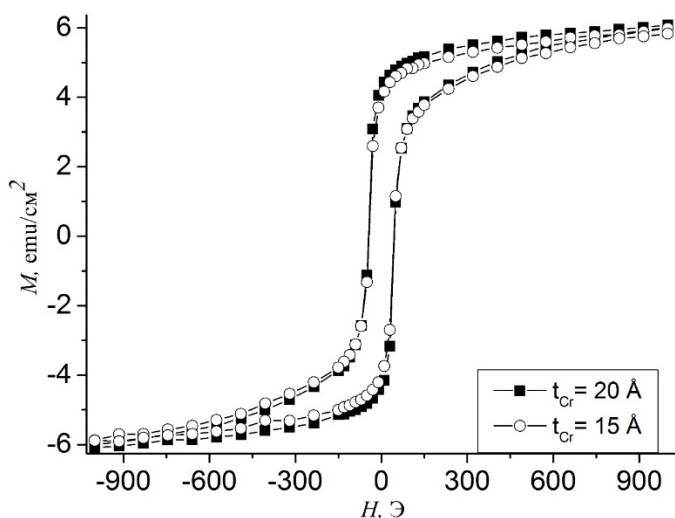


Рисунок 1.1.12.5. Петли гистерезиса для образцов Fe/Cr(t)/Gd с прослойками хрома 15 и 20 Å, измеренные при $T=100 \text{ K}$.

Приложения

1. Акт синтеза образцов. Файл Прилож.1.1.12_1.pdf
2. Отчет по структурной и магнитной характеристике. Файл Прилож.1.1.12_2.pdf

Работы исследователей в возрасте до 39 лет (при наличии)

1.1.13 Теоретическое исследование отражения нейтронов от тонких пленок и слоистых наноструктур, содержащих сильнопоглощающие изотопы гадолиния и бора (молодые исследователи ИФМ УО РАН. Договор 400/1979 от 22.11.2021).

Развитие микроэлектроники инициирует появление новых материалов и совершенствование способов их диагностики. Одним из перспективных методов исследования новых материалов связан с использованием рассеяния нейтронов, в том числе рефлектометрия поляризованных нейтронов, и её развитие особенно актуально в связи с запуском высокопоточного исследовательского реактора нового поколения ПИК и необходимостью создания приборной базы для его инструментов.

Связанное с этим направление, активно развивающееся в последнее время – использование сильнопоглощающих изотопов для создания твердотельных детекторов нейтронов. Такие устройства представляют большой интерес для применения ввиду дефицита изотопа ^3He , на основе которого обычно изготавливаются газовые детекторы нейтронов. Изотопы с сильным резонансным поглощением нейтронов предоставляют также уникальную возможность – плотность длины рассеяния нейтронов можно изменять контролируемым образом прямо в ходе эксперимента, варьируя длину волны нейтронов. Это можно использовать для решения фазовой проблемы, вводя в исследуемые образцы опорный слой, содержащий изотопы с резонансным поглощением.

Практически во всех веществах поглощение тепловых нейтронов незначительно, но для некоторых изотопов оно существенно. Например, два изотопа гадолиния, ^{155}Gd и ^{157}Gd имеют очень большие сечения захвата тепловых нейтронов. Благодаря присутствию этих изотопов в природном гадолинии, его сечение захвата также значительно. Большие величины сечений связаны с наличием в ядрах упомянутых изотопов состояний, с характерной энергией перехода, лежащей в диапазоне энергий тепловых нейтронов. В результате возникает резонансное взаимодействие ядра с тепловым нейтроном, следствием которого является очень высокая вероятность поглощения нейтрона ядром с последующим испусканием гамма-кванта. Это обусловило широкое применение гадолиния в ядерной энергетике, как экранирующего выгорающего поглотителя нейтронов.

Возможно применение этого уникального свойства гадолиния и в научных исследованиях, где применяются тепловые нейтроны, в частности, в нейтронной рефлектометрии. Изучение поглощения нейтронов одновременно с отражением существенно расширяет возможности диагностики и, потому, представляет большой интерес. Но процессы распространения нейтронов в сильнопоглощающих средах слабо изучены и работ по этой тематике не очень много. Группа из Петербургского института ядерной физики (г. Гатчина) исследовала поглощающие свойства гадолиния в целях оптимизации суперзеркал на их основе [1.1.13.1]. В Объединённом институте ядерных исследований (г. Дубна) также проводились теоретические и экспериментальные

исследования взаимодействия медленных нейтронов с гадолинием, определена постоянная составляющая действительной части длины рассеяния [1.1.13.2]. А.И. Франк [1.1.13.3] получил общее выражение для комплексного показателя преломления нейтронов в средах с поглощением. Также было предсказано необычное поведение эффективного сечения взаимодействия при уменьшении скорости падающих нейтронов [1.1.13.4]. К сожалению, эти результаты не получили широкой известности.

Две независимые группы из Национального института стандартов и технологий (NIST) [1.1.13.5] и Делфтского технологического университета (Нидерланды) [1.1.13.6] показали возможность решения фазовой проблемы в нейтронной рефлектометрии путём введения в исследуемый образец опорного слоя, характеристики которого можно изменять в процессе измерений. В этих исследованиях использовался магнитный опорный слой, его характеристики изменялись путём приложения магнитного поля, но сам образец не должен быть магнитным, иначе его характеристики также изменятся.

В дальнейшем этот подход был модифицирован – в качестве материала опорного слоя использовался природный гадолиний. Благодаря резонансному поглощению в слоях гадолиния, его нейтронооптические характеристики можно изменить, меняя длину волны нейтронного пучка. При комнатной температуре гадолиний парамагнитен, что позволяет исследовать образцы с приложением магнитного поля, так как оно не меняет длины рассеяния нейтронов в слоях гадолиния. Методика была апробирована как путём теоретических расчётов [1.1.13.7], так и экспериментально [1.1.13.8].

Сильнопоглощающие вещества типа Gd или соединений бора, обогащённые изотопом ^{10}B могут быть использованы в качестве материалов для твердотельных детекторов нейтронов. В настоящее время детекторы наполняются изотопом ^3He . При попадании в него нейтрона происходит реакция с образованием заряженных частиц - тритона и протона - которые регистрируются газовым счётчиком. Но ^3He - достаточно дорогой изотоп, его запасы в мире малы. Поэтому во многих нейтронных центрах, например, ILL, сейчас возникает интерес к твердотельным детекторам на основе материалов с сильным поглощением тепловых нейтронов [1.1.13.9]. Гадолиний может быть достаточно перспективным веществом для развития данного направления. Зависимость поглощения от длины волны, вероятно, может быть использована для создания энергодисперсионного детектора.

Кроме того, тонкие плёнки гадолиния используются и в нейтронных поляризаторах и учет процессов поглощения нейтронов необходим для точного расчёта параметров таких устройств. В Объединённом институте ядерных исследований (г. Дубна) были проведены эксперименты по определению длины когерентного рассеяния в Gd [1.1.13.10], но точность этих данных может быть повышена путём проведения одновременных измерений отражения и поглощения в структурах с

гадолинием. Сильнопоглощающие вещества типа гадолиния необходимы и для реализации метода нейтронной рефлектометрии с регистрацией вторичного излучения [1.1.13.11], которая может использоваться для идентификации изотопов.

Соответственно, актуальность исследований сильнопоглощающих систем предопределяется востребованностью результатов как для создания приборной базы для нейтронных рефлектометров, так и для развития методов анализа экспериментальных данных. Резонансное поглощение нейтронов, например, изотопами гадолиния, сопровождается генерацией вторичного излучения, детектирование которого открывает новые возможности в развитии методов нейтронной нанодиагностики.

Данная работа направлена на изучение процессов отражения и прохождения нейтронов в многослойных системах, содержащих слои из сильнопоглощающих веществ (природный гадолиний или карбид бора B_4C). Для анализа различных ситуаций используются модельные численные эксперименты. Полученные результаты дадут возможность оптимального выбора сильнопоглощающих систем для различных задач, как прикладных, так и научных.

Метод фазово-амплитудных функций является подходом для решения широкого круга квантово-механических задач. В его основе лежит представление о так называемой фазовой функции $\alpha(r)$, которая имеет простой и наглядный физический смысл [1.1.13.12]. При заданном центральном потенциале значение этой функции в некоторой точке r является фазой рассеяния на части потенциального барьера, заключенного в сфере радиуса r . Фаза рассеяния α на всем потенциальном барьере определяется как предел $\alpha = \lim_{r \rightarrow \infty} \alpha(r)$. Фазовая функция удовлетворяет дифференциальному уравнению Риккати, которое называется фазовым уравнением. Фазовая функция характеризует эффект действия потенциала и равна нулю, если равен нулю потенциал.

Задача описания отражения нейтронов от металлических пленок представляет собой вариант одномерной задачи о взаимодействии частицы (нейтрона) с потенциальным барьером (ядерной структурой отражающего слоя). Волновое уравнение в этом случае имеет вид:

$$\frac{d^2}{dx^2} \psi(x) + [k^2 - V(x)]\psi(x) = 0. \quad (1.1.13.1)$$

Волновая функция представляется в виде суперпозиции падающей и отраженной волн:

$$\psi(x) = A(x)[\exp(ikx) + B(x)\exp(-ikx)]. \quad (1.1.13.2)$$

Подставляя это выражение в уравнение (1.1.13.2) и проведя преобразования [1.1.13.12], можно получить уравнение для амплитуды отраженной волны $B(x)$, имеющее форму фазового уравнения:

$$\frac{d}{dx} B(x) = -\frac{1}{2ik} V(x)[\exp(ikx) + B(x)\exp(-ikx)]^2. \quad (1.1.13.3)$$

Граничное условие $B(0) = 0$, соответствует отсутствию отраженной волны за потенциальным барьером.

Это уравнение не зависит от амплитуды прошедшей волны, поэтому в ряде задач коэффициент прохождения можно не рассчитывать, экономя вычислительные ресурсы. В отличие от исходного уравнения Шрёдингера, фазовое уравнение является уравнением первого порядка, хотя и нелинейным. Оно не имеет аналитического решения для произвольной функции $V(x)$, но численно решается быстрее и проще, чем уравнение (1.1.13.1). В настоящей работе для решения уравнения (1.3) использовался неявный метод Рунге-Кутты второго порядка.

В связи с тем, что функция $B(x)$ обладает свойствами фазовой функции из квантовой механики, но, фактически, описывает амплитуду отражённой волны, её называют фазово-амплитудной функцией.

При непосредственном рассмотрении уравнения (1.1.13.3) предполагают нормальное падение волны на потенциальный барьер, то есть, поток нейтронов должен падать на пленку перпендикулярно ее поверхности. На самом деле рефлектометрия имеет дело со скользящими углами падения. В этом случае в отражении от барьера участвует лишь нормальная составляющая волнового вектора. Тогда в уравнении (1.3) $k = 2\pi/\lambda \sin \theta$, где θ – угол падения, отсчитанный от поверхности пленки, λ – длина волны нейтронов. Вводя обозначение $k_0 = 2\pi/\lambda$, получим $k = k_0 \sin \theta$. В рефлектометрии также часто используют величину $q = 2k$, которая имеет смысл нормальной компоненты изменения волнового вектора при отражении. В дальнейшем будем использовать именно такую нотацию.

Потенциал взаимодействия $V(x)$ связан с плотностью длины рассеяния следующим соотношением [1.1.13.13]:

$$V(x) = 4\pi[\delta(x) + i\beta(x)] \quad (1.1.13.4)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \delta(x) &= \text{Re}[N(x)b(x)] \\ \beta(x) &= \text{Im}[N(x)b(x)], \end{aligned} \quad (1.1.13.5)$$

где $b(x)$ – длина ядерного рассеяния нейтронов на глубине x , $N(x)$ – число частиц в единице объёма на глубине x . Величина $\delta(x)$ описывает преломление и отражение нейтронов в веществе, $\beta(x)$ – поглощение. Их численные значения для различных материалов и длин волн могут быть найдены в справочных таблицах или на Интернет-ресурсах [1.1.13.14], а также рассчитаны самостоятельно. Для большинства веществ $\beta(x) \approx 0$ и потенциал можно рассматривать, как действительный. Но для сильнопоглощающих изотопов эта величина становится существенной, а потенциал взаимодействия – комплексным. Поэтому в дальнейшем будем считать $V(x)$ только комплексной величиной.

При определении начального условия к уравнению (1.1.13.3) предполагали, что слева и справа от потенциального барьера находится вакуум. В случае рефлектометрии это соответствовало

бы изолированной пленке. К сожалению, такие пленки слишком тонки, чтобы они могли существовать сами по себе. Их всегда синтезируют на подложках, очень толстых ($\sim 10^{-3}$ м) по сравнению с характерными толщинами пленок ($\sim 10^{-9}$ – 10^{-8} м), и их можно рассматривать как полубесконечную среду с одной стороны пленки. Это приводит к тому, что за исследуемой структурой плёнки тоже возникает отраженная от подложки волна, и именно ее амплитуда должна быть взята в качестве граничного условия для уравнения (1.1.13.3).

Амплитуда отражения от поверхности среды описывается формулой Френеля [1.1.13.13]:

$$r_F(k) = \frac{k - \sqrt{k^2 - V(0)}}{k + \sqrt{k^2 - V(0)}} \quad (1.1.13.6)$$

Тогда начальное условие в уравнении (1.1.13.3) для заданного k будет иметь вид $B(k, 0) = r_F(k)$, если отсчёт координаты начинается от нуля.

Уравнение для амплитуды прошедшей волны выводится аналогично уравнению (1.1.13.3) и имеет вид:

$$\frac{d}{dx}A(x) = -\frac{1}{2ik}V(x)A(x)[\exp(ikx) + B(x)\exp(-ikx)] \quad (1.1.13.7)$$

В отличие от (1.3) это уравнение линейно, и можно записать формальное решение для произвольного вида функций $V(x)$ и $B(x)$ через неопределённый интеграл. Но численное решение методом Рунге-Кутты оказывается проще.

В отсутствие подложки граничное условие имеет простой вид $A(0) = 1$. При её наличии, амплитуда прошедшей волны уменьшается на величину амплитуды многократно отражённой волны на интерфейсе «плёнка-подложка». Граничное условие в этом случае выглядит следующим образом:

$$A(k, 0) = \frac{1}{1 - |B(k, 0)|^2} \quad (1.1.13.8)$$

Коэффициенты отражения и прохождения для всей плёнки (значения, измеряемые в эксперименте) выражаются через значения функций A и B на поверхности плёнки:

$$R(k) = |B(k, x_N)|^2, \quad T(k) = |A(k, x_N)|^{-2} \quad (1.1.13.9)$$

Зная вид функций $A(k, x)$ и $B(k, x)$, можно восстановить волновую функцию в зависимости от глубины и волнового числа, используя соотношение (1.1.13.2). Это даёт возможность рассчитать плотность вероятности обнаружения нейтрона на любой глубине и решать иные квантовомеханические задачи. Таким образом, метод фазово-амплитудных функций очень удобен для анализа процессов распространения нейтронов в конденсированных средах. Простота используемых уравнений обеспечивает высокую скорость и точность расчётов.

В отличие от ядерного рассеяния нейтронов, взаимодействие поляризованных нейтронов с магнитными моментами атомов является более сложной задачей многоканального рассеяния. Возникает два канала рассеяния – для нейтронов со спином «вверх» и для нейтронов со спином

«вниз» (направления выбраны условно). Для упрощения дальнейших выкладок введём обозначения: канал нейтронов со спином «вверх» обозначим знаком «+» (плюс); канал нейтронов со спином «вниз» знаком «-» (минус). Кроме того, имеется перемешивание каналов – нейтроны могут изменить направление спина в момент рассеяния на образце.

В результате мы получим четыре, различных в общем случае, коэффициента отражения: два основных, без изменения состояния («++» и «--»), и два с изменением состояния («+-» и «-+»). Из-за наличия взаимодействия каналов невозможно получить независимые уравнения для каждого коэффициента отражения. Фазовое уравнение принимает матричный вид, хотя схема его вывода остаётся аналогичной описанной в [1.1.13.12, 1.1.13.15, 1.1.13.16]:

$$\frac{d}{dx} B = (E^+ + BE^-)V(E^+ + BE^-). \quad (1.1.13.10)$$

Здесь B – матрица коэффициентов отражения:

$$B \equiv \begin{pmatrix} B_{++}(x, k) & B_{+-}(x, k) \\ B_{-+}(x, k) & B_{--}(x, k) \end{pmatrix}, \quad (1.1.13.11)$$

каждый элемент матрицы является коэффициентом отражения в определённом канале рассеяния и представляет собой функцию глубины x и волнового числа k .

Матрица V описывает потенциал взаимодействия в каждом канале:

$$V \equiv \begin{pmatrix} V_{++}(x) & V_{+-}(x) \\ V_{-+}(x) & V_{--}(x) \end{pmatrix}. \quad (1.1.13.12)$$

Чаще всего потенциал взаимодействия является функцией только глубины. Но для некоторых веществ, ядра которых резонансно взаимодействуют с тепловыми нейтронами, может возникнуть зависимость потенциала от длины волны и, следовательно, от волнового числа. Примером такого вещества является гадолиний.

Матрицы E^+ и E^- связаны с падающей и отражённой волнами соответственно:

$$E^+ \equiv \begin{pmatrix} \frac{e^{ikx}}{\sqrt{-2ik}} & 0 \\ 0 & \frac{e^{ikx}}{\sqrt{-2ik}} \end{pmatrix}, \quad E^- \equiv \begin{pmatrix} \frac{e^{-ikx}}{\sqrt{-2ik}} & 0 \\ 0 & \frac{e^{-ikx}}{\sqrt{-2ik}} \end{pmatrix}. \quad (1.1.13.13)$$

Все произведения в уравнении (1.1.13.10) являются матричными и в общем случае некоммутативны.

По аналогии с (1.1.13.5) введём обозначения для описания ядерного рассеяния:

$$\begin{aligned} \delta_n(x) &= \text{Re}[N(x)b_n(x)] \\ \beta_n(x) &= \text{Im}[N(x)b_n(x)], \end{aligned} \quad (1.1.13.14)$$

где $b_n(x)$ – длина ядерного рассеяния нейтронов на глубине x , $N(x)$ – число частиц в единице объёма на глубине x . Величина $\delta_n(x)$ описывает преломление и отражение нейтронов в веществе, $\beta_n(x)$ – поглощение.

Для магнитного рассеяния:

$$\begin{aligned}\delta_m(x) &= \mu(x)N(x)b_m(x) \\ \beta_m(x) &= 0,\end{aligned}\tag{1.1.13.15}$$

где $b_m(x)$ - длина магнитного рассеяния нейтронов, $\mu(x)$ – магнитный момент частиц на глубине x в магнетонах Бора. Мнимая часть длины рассеяния отсутствует, поскольку взаимодействие с магнитной подсистемой не приводит к поглощению нейтронов.

Тогда элементы матрицы потенциала V могут быть представлены следующим образом [1.1.13.13]:

$$\begin{aligned}V_{++}(x) &= 4\pi[\delta_n(x) + \delta_m(x) \cos \alpha + i\beta_n(x)], \\ V_{--}(x) &= 4\pi[\delta_n(x) - \delta_m(x) \cos \alpha + i\beta_n(x)], \\ V_{+-}(x) &= V_{-+}(x) = 4\pi\delta_m(x) \sin \alpha.\end{aligned}\tag{1.1.13.16}$$

Здесь введена величина α – угол между направлением магнитного момента падающих нейтронов и направлением магнитного момента частиц образца. Если в образце не ферромагнитное упорядочение, то α различен в разных слоях. В геликоидальных системах с плавным поворотом магнитного момента угол является функцией глубины $\alpha(x)$.

В случае несимметричного взаимодействия каналов рассеяния $V_{+-}(x) \neq V_{-+}(x)$, но в рефлектометрии поляризованных нейтронов такие задачи не рассматриваются.

Матричное уравнение (1.1.13.10) может быть представлено и в виде системы из четырёх связанных дифференциальных уравнений для каждого коэффициента отражения. Такая система является весьма громоздкой для записи и неудобной для численного решения, хотя может быть полезна для теоретического анализа частных случаев при определённых значениях и соотношениях между элементами потенциала. Например, используя систему, легко показать, что, если $V_{+-}(x) = V_{-+}(x)$, то и $B_{+-}(x) = B_{-+}(x)$. Но для расчётных задач предпочтительнее более компактная матричная форма.

Коэффициент поглощения нейтронов может быть рассчитан исходя из закона сохранения числа частиц. Нейтроны первичного пучка могут быть отражены от плёнки, пройти сквозь неё или быть поглощёнными в объёме плёнки. Рассматривая общий случай поляризованных нейтронов и нормируя интенсивность первичного пучка на единицу, получим расчётные формулы для каналов:

$$\begin{aligned}\mu_+(k) &= 1 - R_{++}(k) - R_{+-}(k) - T_+(k) \\ \mu_-(k) &= 1 - R_{--}(k) - R_{-+}(k) - T_-(k)\end{aligned}\tag{1.1.13.17}$$

В случае неполяризованных нейтронов формула несколько упрощается:

$$\mu(k) = 1 - R(k) - T(k)\tag{1.1.13.18}$$

Рассмотрим образец типа резонатора: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/^{10}\text{B}_4\text{C}(25 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$. Тантал выполняет роль сильноотражающих обкладок, которые формируют потенциальную яму. Ванадий имеет очень малую отрицательную плотность длины рассеяния нейтронов, и хорошо подходит для заполнения внутреннего пространства ямы. Карбид бора,

обогащённый изотопом ^{10}B , является сильнопоглощающим слоем внутри потенциальной ямы. В резонаторе, в потенциальной яме, возникает стоячая нейтронная волна, которая, взаимодействуя с падающей, усиливает прохождение (тем самым уменьшая отражение). На Рис. 1.1.13.1. приведена область полного внешнего отражения для указанного выше образца. Хорошо виден резонансный минимум, спад интенсивности после $q = 0.016 \text{ \AA}^{-1}$ – критический угол.

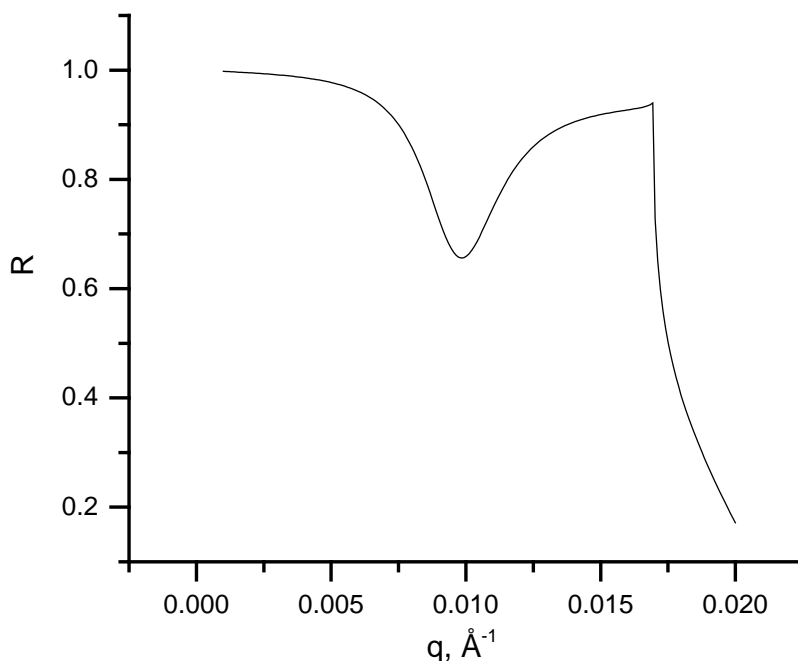


Рисунок 1.1.13.1. Резонансный минимум на полном внешнем отражении в системе $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/^{10}\text{B}_4\text{C}(25 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$

Сильнопоглощающий слой (в рассматриваемом примере $^{10}\text{B}_4\text{C}$) делает резонансный провал более выраженным. Если известна ширина потенциальной ямы (слоя V), то из анализа формы провала можно определить плотность длины рассеяния $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Это делается путём уточнения параметров по алгоритму Левенберга-Марквардта.

Если использовать в качестве поглощающего слоя гадолиний, ядра изотопов которого резонансно взаимодействуют с тепловыми нейтронами, то можно ещё больше увеличить глубину провала (Рис. 1.1.13.2).

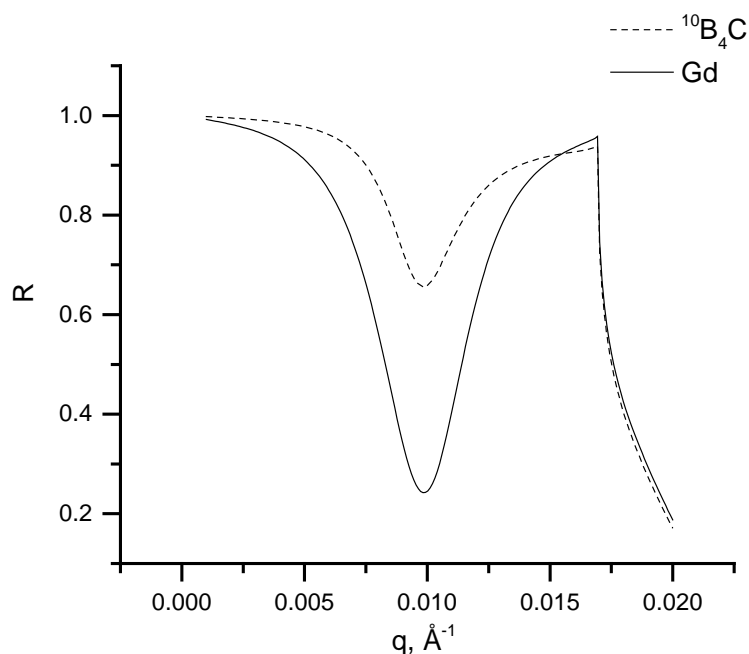


Рисунок 1.1.13.2. Резонансные минимумы на полном внешнем отражении в системах $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{X}(25 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$, где $\text{X} = {}^{10}\text{B}_4\text{C}$, Gd

Приведённый расчёт соответствует времяпролётному рефлектометру. Определить непосредственно плотность длины рассеяния Gd в этом случае нельзя, поскольку она зависит от энергии нейтронов [1.1.13.17]. Но, также используя алгоритм Левенберга-Марквардта, можно определить энергетические характеристики резонансов Gd, а затем рассчитать плотность длины рассеяния, как функцию энергии нейтронов, используя формулу Брейта-Вигнера.

Возникающую в резонаторе стоячую волну можно визуализировать, если, используя приведённые выше алгоритмы, рассчитать волновую функцию нейтронов и построить квадрат модуля этой функции (Рис. 1.1.13.3).

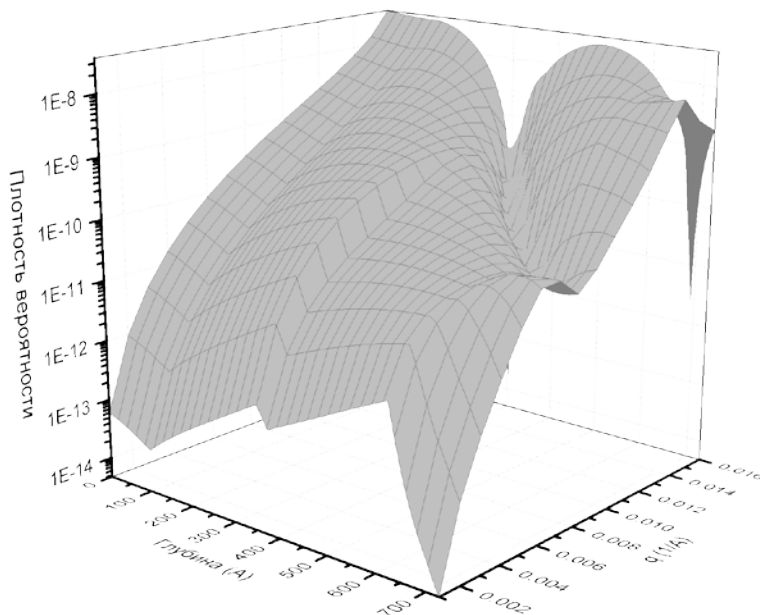


Рисунок 1.1.13.3. Плотность вероятности обнаружить нейтрон в системе $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Gd}(25 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$.

Математический смысл поверхности, изображённой на Рис. 1.1.13.3 – плотность вероятности обнаружить нейтрон с определённой энергией на некоторой глубине в образце. Перепад высот примерно по средней линии – поглощающий слой Gd, который уменьшает количество нейтронов за ним. «Долина»-минимум является узлом стоячей волны. Энергия, при которой узел «входит» в область потенциальной ямы, соответствует минимуму отражения. На Рис. 1.1.13.4 показано поведение коэффициентов прохождения и поглощения вблизи минимума.

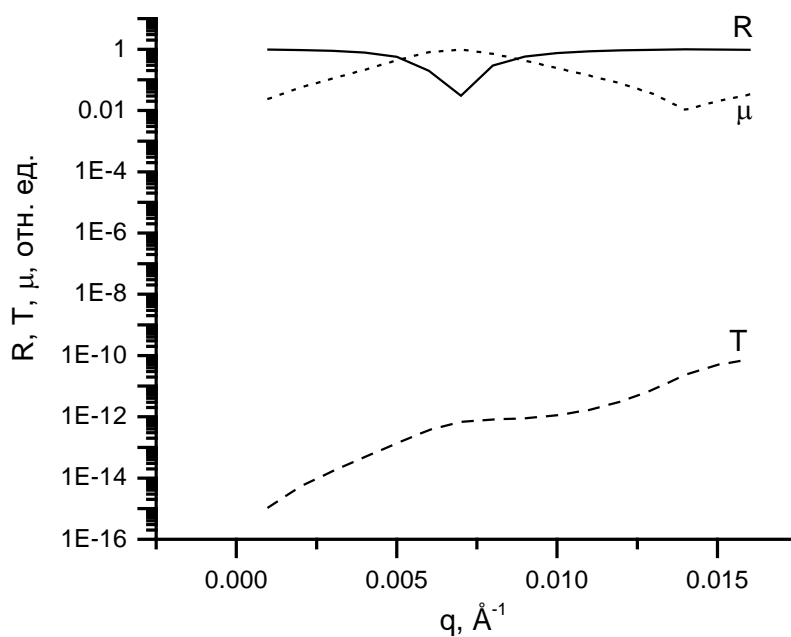


Рисунок 1.1.13.4. Коэффициенты отражения (линия), прохождения (штрих) и поглощения (пунктир) в области полного внешнего отражения.

Видно, что коэффициент прохождения очень мал, и поведение коэффициента отражения полностью определяется коэффициентом поглощения. Следовательно, измерив рефлектометрическую кривую в данной области, что является более простым экспериментом, мы получим полную информацию о поглощении.

Если сделать потенциальную яму достаточно широкой, в ней может оказаться несколько узлов стоячей волны. Тогда в области полного внешнего отражения окажется столько же минимумов. На Рис. 1.1.13.5 показано отражение для системы $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(1000 \text{ \AA})/\text{Gd}(25 \text{ \AA})/\text{V}(1000 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$, в которой возникает 4 минимума.

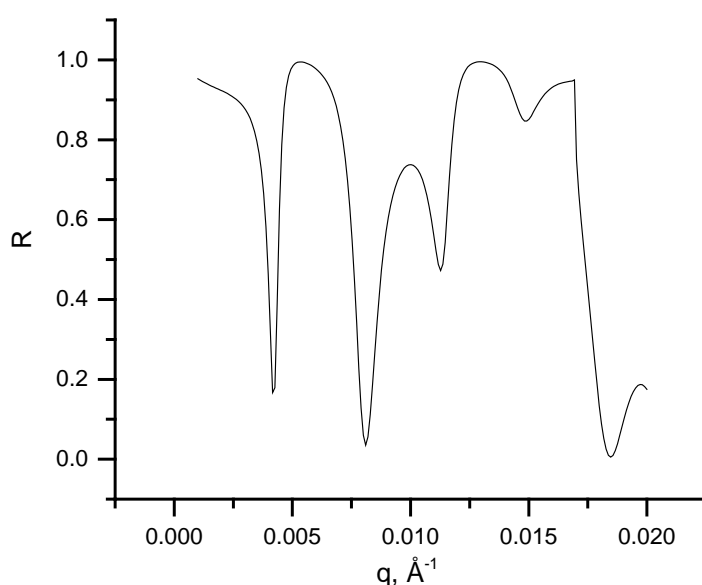


Рисунок 1.1.13.5. Коэффициент отражения для системы $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(1000 \text{ \AA})/\text{Gd}(25 \text{ \AA})/\text{V}(1000 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$ с большим количеством резонансных минимумов.

Такая сложная картина полного внешнего отражения позволяет с большей точностью определить энергетические характеристики резонансов гадолиния или плотность длины рассеяния карбида бора.

В настоящей работе проведено теоретическое исследование особенностей распространения нейтронов в многослойных системах с сильнопоглощающими слоями (гадолиний или карбид бора). Предложен эффективный подход для расчёта коэффициентов отражения, прохождения и поглощения, в том числе и поляризованных нейтронов. Показано, что анализ минимумов в области полного внешнего отражения позволяет определить плотность длины рассеяния сильнопоглощающих изотопов и её зависимость от энергии нейтронов. Написаны программы для ЭВМ, реализующие предложенные алгоритмы, они апробированы на модельных численных

экспериментах. Наличие глубоких узких минимумов на полном внешнем отражении даёт возможность применять такие многослойные системы для реализации селективного поглощения низкоэнергетических нейтронов. Визуализация стоячей волны даёт возможность подбирать оптимальные для поставленной задачи ширину потенциальной ямы, положение и толщину сильнопоглощающего слоя. Это может быть полезно при расчёте реальных устройств – твёрдотельных детекторов и нейтронных детекторов. Все полученные теоретические результаты могут быть проверены экспериментально.

Приложения

1. Отчет об исследовании отражения нейтронов от тонких пленок и слоистых наноструктур, содержащих сильнопоглощающие изотопы гадолиния и бора. Файл Прилож.1.1.13.pdf

1.1.14 Синтез, структурная и магнитная характеристика наногетероструктур MgO (молодые исследователи ИФМ УО РАН. Договор 400/1979 от 22.11.2021).

На первом этапе выполнения проекта была синтезирована серия многослойных тонких пленок и сверхрешеток на основе Fe/MgO/Gd и Gd/MgO/Fe, отличающихся толщиной, очередностью и числом повторений слоев Nb, Fe, Gd и MgO. Образцы были синтезированы методом высоковакуумного магнетронного распыления на постоянном токе на установке MPS-4000-C6 фирмы ULVAC (Япония).

В качестве подложки использовались пластины стекла фирмы CORNING толщиной 2 мм и размером 25×25 мм². При синтезе образцов использовались следующие параметры магнетронного распыления: мощность магнетронного распыления 100 Ватт, остаточное давление газов в камере напыления перед запуском аргона – $5 \cdot 10^{-7}$ Па, давление аргона (чистота аргона – 99,9998 %) – 0.1 Па (во время напыления), частота вращения подложки – 10 об/мин.

Рост производился на подложках из стекла, на них был нанесен буферный слой Nb толщиной 20 нм, на котором затем росли многослойные тонкие пленки и сверхрешетки Fe/MgO/Gd и Gd/MgO/Fe с различной толщиной слоев Fe, MgO и Gd. Для защиты от окисления на верхние слои Gd либо Fe был нанесен защитный слой Nb толщиной 3 и 5 нм. Рост производился при комнатной температуре. Параметры роста слоев (скорости и температуры роста) Nb, Fe, Gd и MgO в образцах были подобраны нами методом «проб и ошибок» с тем, чтобы обеспечить наилучший баланс между качеством межслойных границ (контролируется с помощью рентгеновской рефлектометрии) и внутрислойной кристаллической структурой (контролируется с помощью рентгеновской дифракции высокого разрешения).

В таблице 1.1.14.1. представлены композиция и номинальные толщины слоев, образующих синтезированные многослойные тонкие пленки и сверхрешетки. В приведенных формулах указаны номинальные толщины слоев.

№ образца	Формула образца
1	glass//Nb(20 нм)/Fe(1 нм)/Gd(1 нм)/Nb(3 нм)
2	glass//Nb(20 нм)/Fe(1 нм)/MgO(0.4 нм)/Gd(1 нм)/Nb(3 нм)
3	glass//Nb(20 нм)/Fe(1 нм)/MgO(0.8 нм)/Gd(1 нм)/Nb(3 нм)
4	glass//Nb(20 нм)/Fe(1 нм)/MgO(1.2 нм)/Gd(1 нм)/Nb(3 нм)
5	glass//Nb(20 нм)/Gd(1 нм)/Fe(1 нм)/Nb(3 нм)
6	glass//Nb(20 нм)/Gd(1 нм)/MgO(0.4 нм)/Fe(1 нм)/Nb(3 нм)
7	glass//Nb(20 нм)/Gd(1 нм)/MgO(0.8 нм)/Fe(1 нм)/Nb(3 нм)

8	glass//Nb(20 нм)/Gd(1 нм)/MgO(1.2 нм)/Fe(1 нм)/Nb(3 нм)
9	glass//Nb(20 нм)/[Fe(5 нм)/Gd(5 нм)] ₆ /Nb(5 нм)
10	glass//Nb(20 нм)/[Gd(5 нм)/Fe(5 нм)] ₆ /Nb(5 нм)
11	glass//Nb(20 нм)/[Gd(5 нм)/MgO(0.4 нм)Fe(5 нм)] ₆ /Nb(5 нм)
12	glass//Nb(20 нм)/[Gd(5 нм)/MgO(0.8 нм)Fe(5 нм)] ₆ /Nb(5 нм)
13	glass//Nb(20 нм)/[Gd(5 нм)/MgO(1.2 нм)Fe(5 нм)] ₆ /Nb(5 нм)
14	glass/Nb(20 нм)/[Gd(5 нм)/Fe(5 нм)] ₁₂ /Nb(5 нм)

Таблица 1.1.14.1 - Список синтезированных многослойных тонких пленок и сверхрешеток на основе MgO

Для структурной характеристики многослойных тонких пленок и сверхрешеток на основе Fe/MgO/Gd и Gd/MgO/Fe использовались методы рентгеновской рефлектометрии и рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения.

Рентгеноструктурный анализ проводился с использованием специализированного рентгеновского дифрактометра PANalytical Empyrean Series 2 на излучении Cu-K α с длиной волны 0.154 нм. Для формирования параллельного пучка на первичном пучке использовалось параболическое зеркало на основе сверхрешетки W/Si, обеспечивающее, помимо формирования параллельного пучка, подавление линии Cu-K β излучения и непрерывного спектра. Высота пучка, ограниченного щелью, составляла 0.05 мм. В рефлектометрических измерениях на вторичном пучке использовался плоскопараллельный коллиматор в комбинации с плоским графитовым монохроматором и коллимирующей щелью с экваториальной апертурой 0.1 мм.

На рисунках 1.1.14.1 – 1.1.14.13 представлены экспериментальные рефлектограммы (черные символы/черная линия) вместе с результатом фитирования (красная линия), измеренные на излучении Cu от образцов № 1 - № 13 соответственно. Из обработки (фитирования) рефлектограмм нами были определены толщины отдельных слоев, образующих многослойные тонкие пленки и сверхрешетки, а также плотности материалов и среднеквадратичные шероховатости межслойных границ.

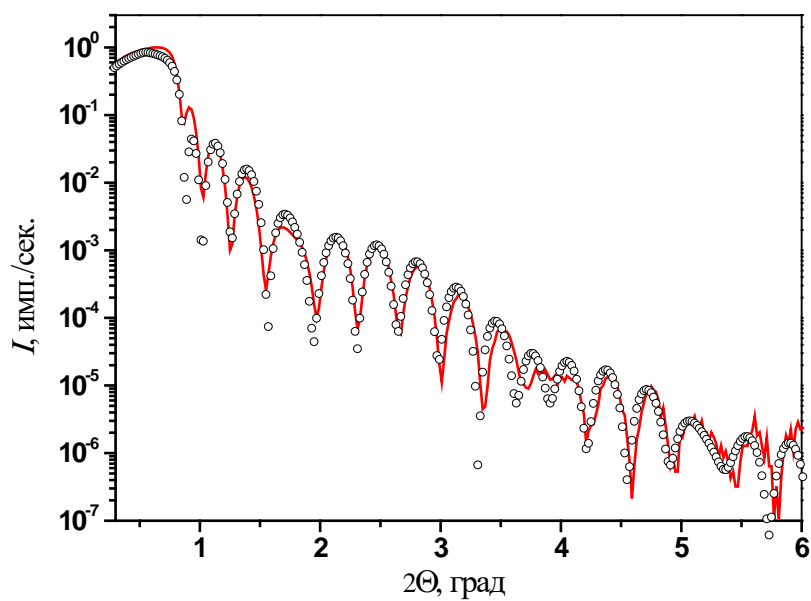


Рисунок 1.1.14.1 – Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 1 (линия из черных символов) измеренная при излучении Си и модельная кривая (красная линия).

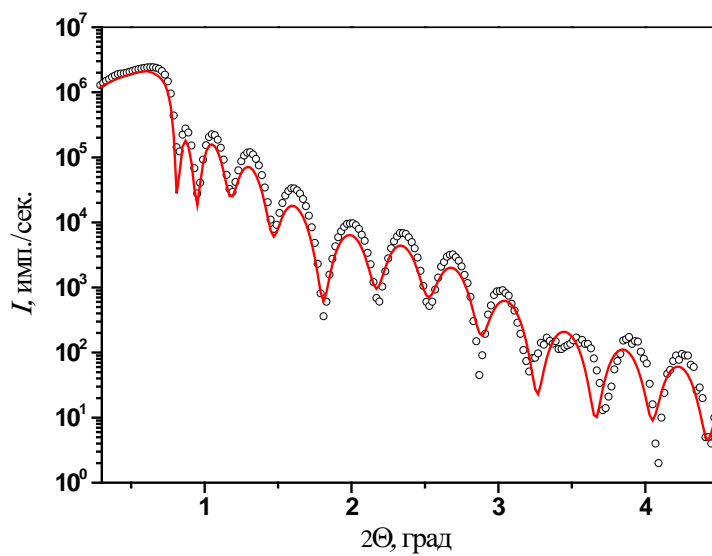


Рисунок 1.1.14.2 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 2 (линия из черных символов) измеренная при излучении Си и модельная кривая (красная линия).

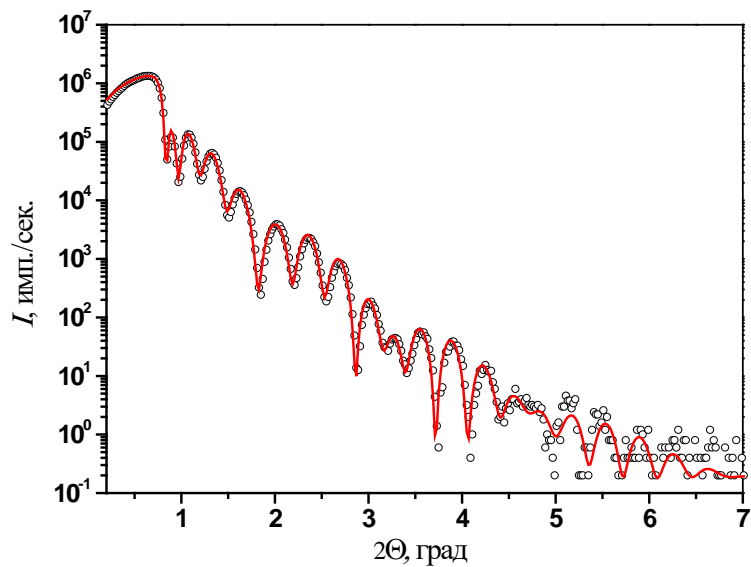


Рисунок 1.1.14.3 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 3 (линия из черных символов) измеренная при излучении Си и модельная кривая (красная линия).

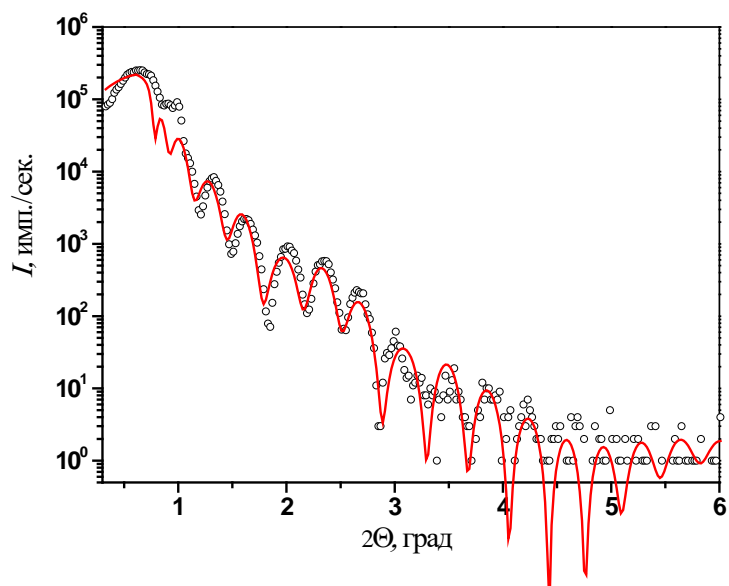


Рисунок 1.1.14.4 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 4 (линия из черных символов) измеренная при излучении Си и модельная кривая (красная линия).

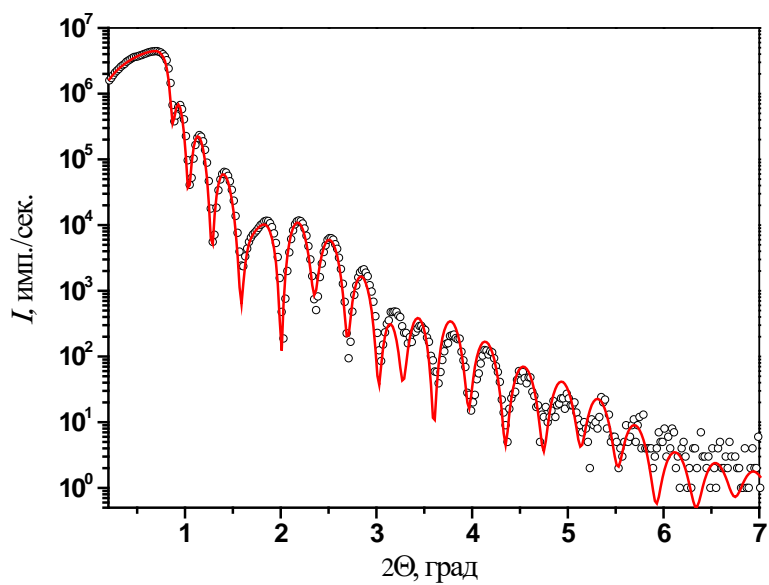


Рисунок 1.1.14.5 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 5 (линия из черных символов) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия).

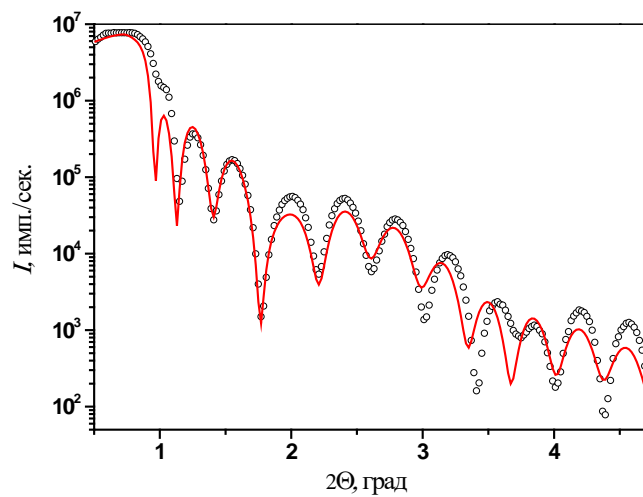


Рисунок 1.1.14.6 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 6 (линия из черных символов) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия).

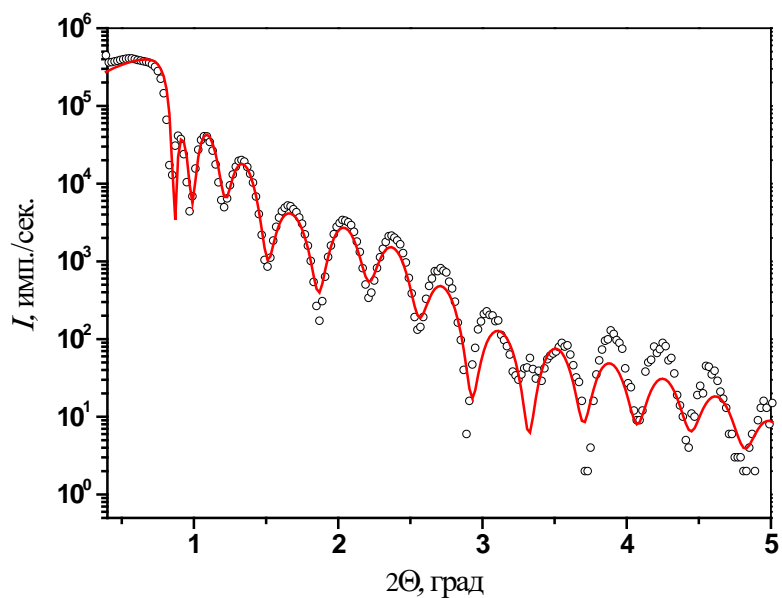


Рисунок 1.1.14.7 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 7 (линия из черных символов) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия).

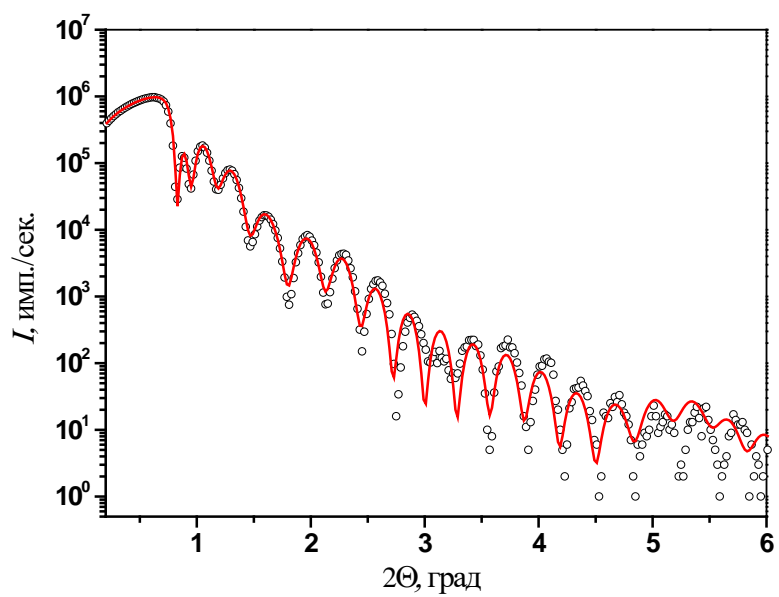


Рисунок 1.1.14.8 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 8 (линия из черных символов) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия).

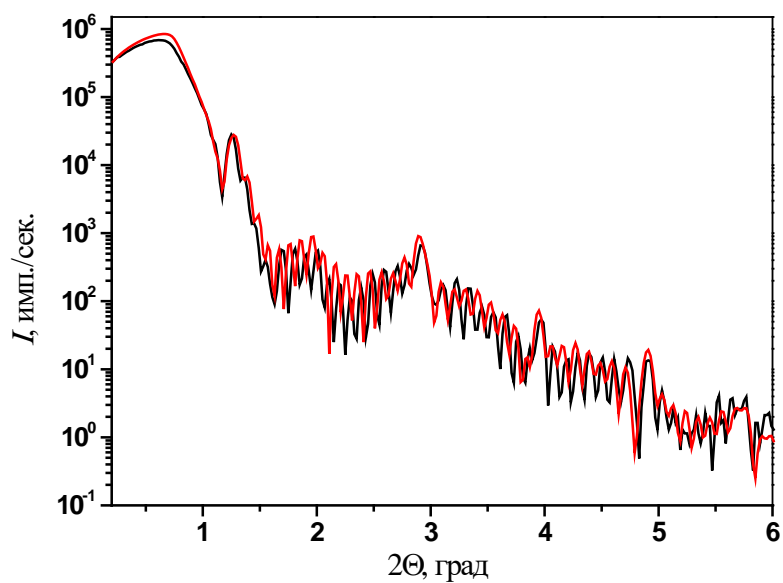


Рисунок 1.1.14.9 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 9 (черная линия) измеренная при излучении Си и модельная кривая (красная линия).

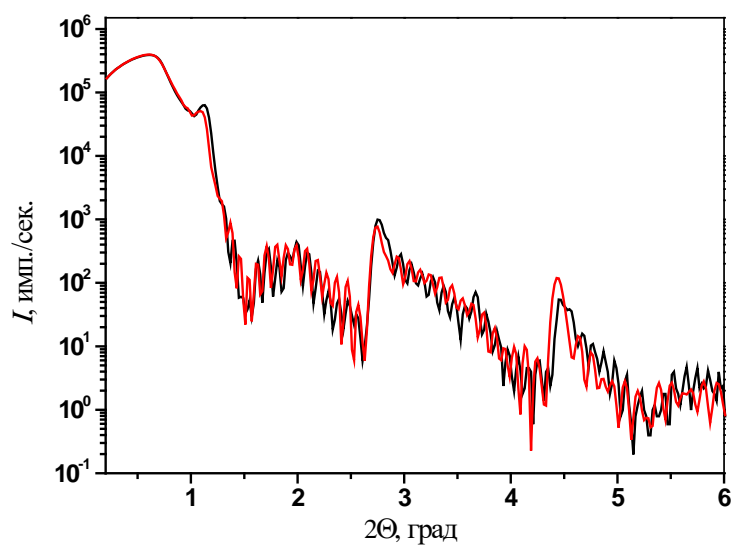


Рисунок 1.1.14.10 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 10 (черная линия) измеренная при излучении Си и модельная кривая (красная линия).

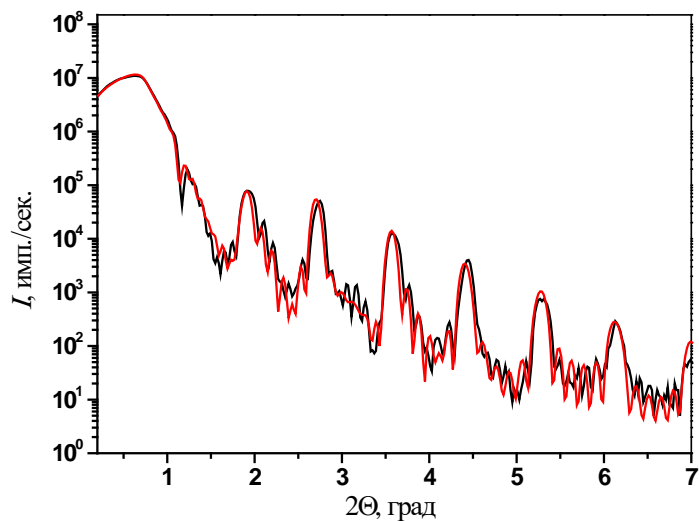


Рисунок 1.1.14.11- Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца №11(черная линия) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия).

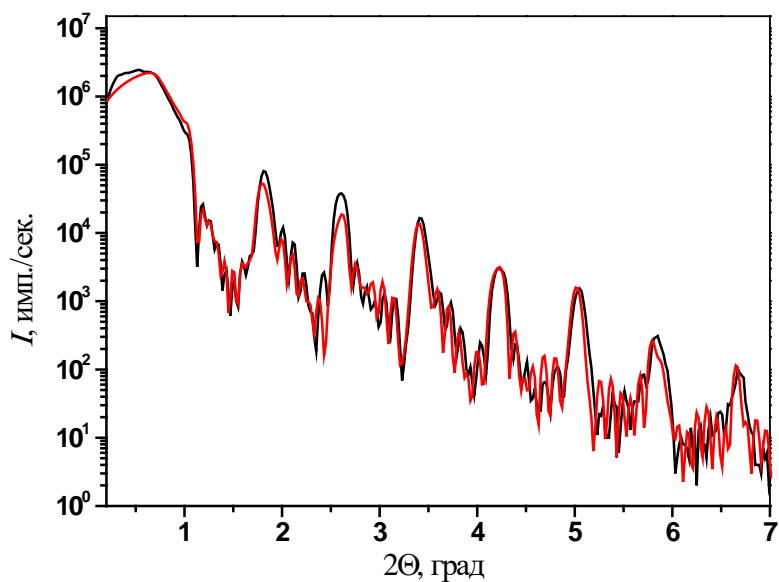


Рисунок 1.1.14.12 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца №12(черная линия) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия).

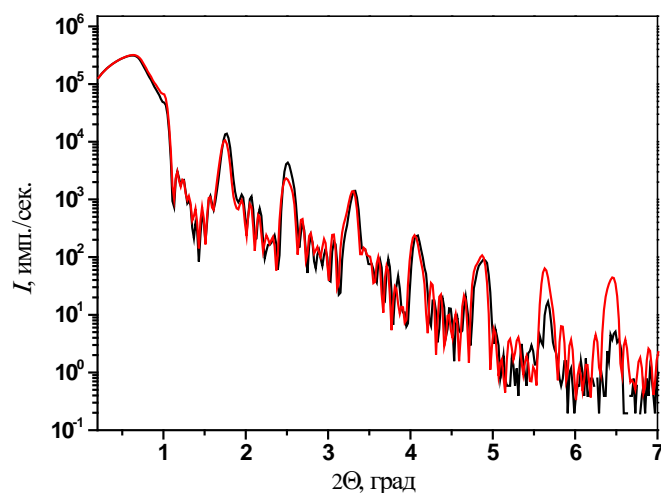


Рисунок 1.1.14.13 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца №13 (черная линия) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия).

Ниже в таблице 1.1.14.2 приведены параметры модельных кривых, соответствующих образцам № 1-14. Отметим, что толщины слоев близки к номинальным, а также формируется слоистая структура с довольно четкими границами раздела и величинами межслойных шероховатостей, приблизительно 10% от толщины самого слоя.

Образец	Материал слоя	Толщина слоя, нм	Межслойная шероховатость, нм	Плотность, г/см ³
1	Nb	20.6	1.5	9.2
	Fe	1.2	0.1	5.6
	Gd	1	0.1	6.4
	Nb	2.1	0.2	8.4
	NbO ₂	2.7	0.6	4.5
2	Nb	21.1	1.4	8
	Fe	0.8	0.3	7
	MgO	0.6	0.1	3.4
	Gd	1	0.1	7.2
	Nb	2	0.2	7.9
	NbO ₂	2.8	1.1	6.3
3	Nb	21.1	0.6	8.5
	Fe	0.8	0.1	7.4
	MgO	1.2	0.1	3.3
	Gd	0.9	0.1	7.1
	Nb	2.4	0.2	9.3
	NbO ₂	2.6	0.3	6.1
4	Nb	21.1	0.9	7.7

	Fe	0.6	0.1	8.6
	MgO	1.8	0.1	3.3
	Gd	1.6	0.2	8.7
	Nb	4.4	0.4	8.9
	NbO ₂	3.8	1.3	5.4
5	Nb	20.2	0.6	9.1
	Gd	0.3	0.1	9
	Fe	0.9	0.1	6.9
	Nb	2.7	0.3	9.5
	NbO ₂	2.9	0.7	5.6
6	Nb	21.1	0.9	7.7
	Gd	0.7	0.1	8.6
	MgO	0.7	0.1	3.3
	Fe	1.6	0.2	8.7
	Nb	4.4	0.5	8.9
	NbO ₂	3.8	1.7	5.4
7	Nb	21.6	0.1	9.3
	Gd	0.6	0.1	8.3
	MgO	1.1	0.1	3
	Gd	0.8	0.1	7
	Nb	2.2	0.2	8.9
	NbO ₂	3.4	1	6.5
8	Nb	21.4	0.5	9
	Gd	0.8	0.1	7.1
	MgO	1.6	0.2	2.9
	Fe	1	0.1	5.7
	Nb	2.4	0.1	8.9
	NbO ₂	2.9	0.5	5
9	Nb	20.7	2.5	6.5
	Fe	5	0.1	6.8
	Gd	5	0.1	7.5
	Nb	4.2	0.3	8.4
	NbO ₂	2.5	0.4	5.4
10	Nb	19	0.7	9.4
	Gd	4.3	0.5	7.4
	Fe	4.8	0.5	7.6
	Nb	4.1	0.4	8.7
	NbO ₂	2.5	0.4	5.4
11	Nb	21	0.4	9.4
	Gd	5.2	0.6	7.8
	MgO	0.35	0.1	2.9
	Fe	4.6	0.5	8
	Nb	4.1	0.4	8.6
	NbO ₂	2.6	0.6	5.4
12	Nb	20.5	0.4	7.8
	Gd	4.8	0.2	7.8
	MgO	1.1	0.1	3.2
	Fe	4.4	0.5	8.1

	Nb	4.3	0.3	9.3
	NbO ₂	2.8	0.4	5.4
13	Nb	20.5	0.8	8.8
	Gd	4.8	0.4	7.8
	MgO	1.7	0.2	3.2
	Fe	4.5	0.4	8
	Nb	4.2	0.4	9.1
	NbO ₂	2.6	0.5	5.4
14	Nb	19.4	2.6	3.9
	Gd	5.9	0.6	6.6
	Fe	4.9	0.5	6.8
	Nb	4.3	0.3	7.5
	NbO ₂	2.6	0.8	4.8

Таблица 1.1.14.2. Структурные параметры образцов 1-14, полученные после обработки данных рентгеновской рефлектометрии.

Для решения задачи по структурной характеристике многослойных тонких пленок и сверхрешеток на основе Fe/MgO/Gd и Gd/MgO/Fe были проведены дифракционные измерения для определения их кристаллической структуры. Для этого были использованы рентгеновские методики дифрактометрии высокого разрешения. На рисунке Таблица 1.1.14.1. Структурные параметры образцов 1-14, полученные после обработки данных рентгеновской рефлектометрии.14, представлена кривая рентгеновской дифракции от образца № 1, измеренная вдоль направления роста образца. На дифрактограмме проиндексированы наблюдаемые рефлексы. Наблюдаются рефлексы двух порядков от буферного слоя Nb (110) и Nb (220). Кривые рентгеновской дифракции для образцов 2-8, 10 и 12-14 не приведены в отчете, так как являются абсолютно идентичными друг другу и полностью повторяют кривую на рисунке Таблица 1.1.14.1. Структурные параметры образцов 1-14, полученные после обработки данных рентгеновской рефлектометрии.14.

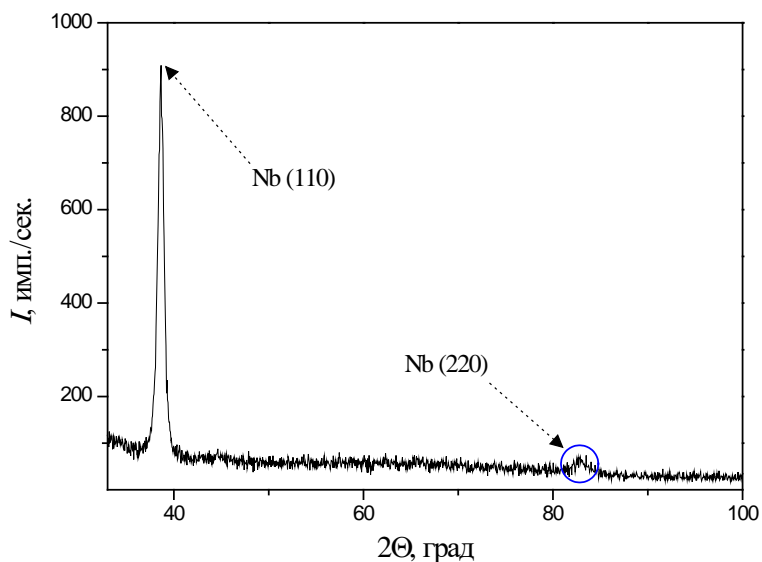


Рисунок 1.1.14.14 - Дифрактограмма от образца №1, измеренная вдоль направления роста образца.

На рисунке 1.1.14.15 представлены рентгеновские дифрактограммы сверхрешеток: glass//Nb(20 нм)/[Fe(5 нм)/Gd(5 нм)]6/Nb(5 нм) образец 9 – сверху и glass//Nb(20 нм)/[Gd(5 нм)/MgO(0.4 нм)Fe(5 нм)]6/Nb(5 нм) образец 11 – снизу. Данные образцы отличаются последовательностью слоев железа и гадолиния, а также наличием тонкого слоя MgO в 0.4 нм в образце №11. На графике наблюдаются рефлексы двух порядков от буферного слоя Nb (110) и Nb (220), а также рефлекс Fe (110). На приведенной дифрактограмме, которая соответствует сверхрешетке без тонкого слоя MgO (образец 9) видно, что рефлекс от Fe (110) выражен более четко.

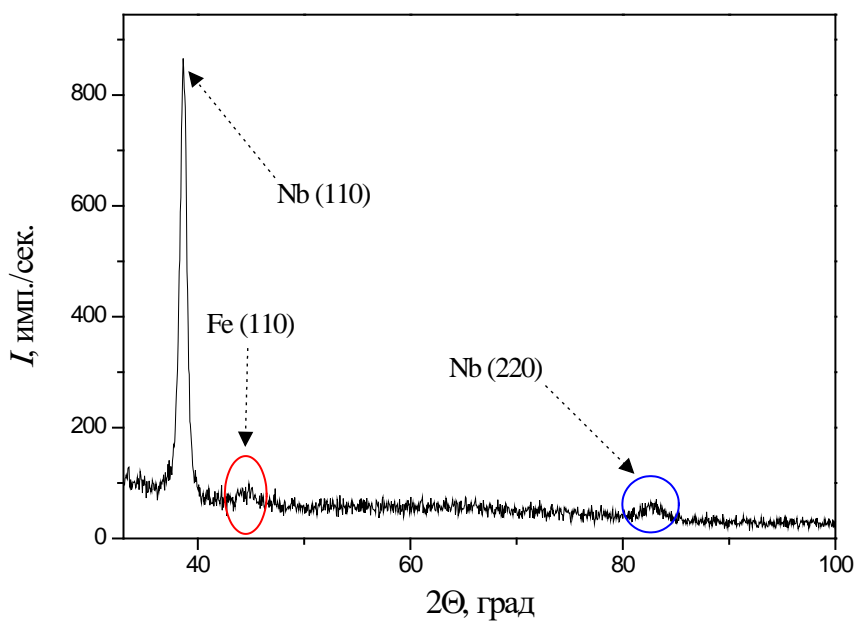
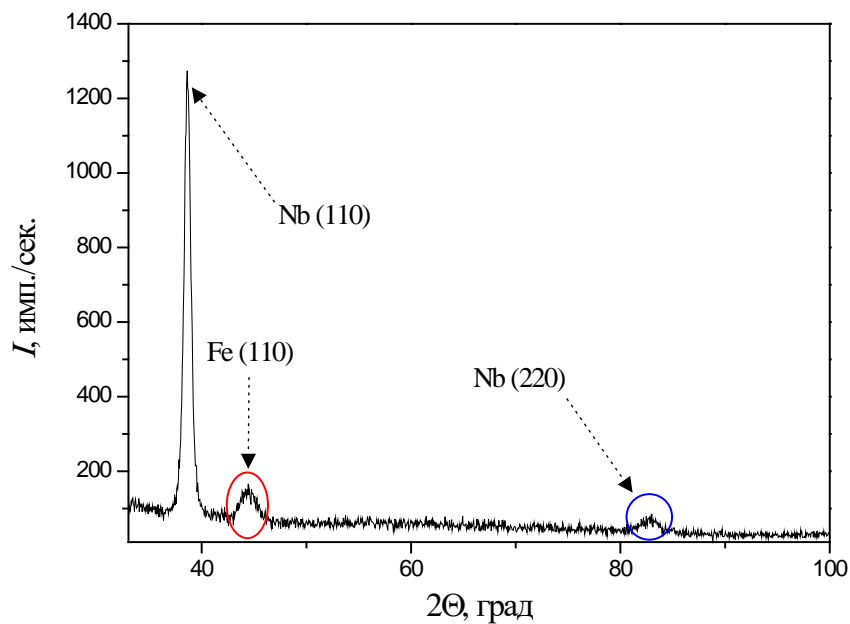


Рисунок 1.1.14.15 - Дифрактограммы от образцов №9 (сверху) и №11(снизу), измеренные вдоль направления роста образцов.

Таким образом, анализ данных рентгеновских исследований позволяет сделать вывод, что в синтезированных многослойных тонких пленках и сверхрешетках на основе Fe/MgO/Gd и Gd/MgO/Fe сформировалась слоистая структура с толщинами слоев, близкими к номинальным, а также величинами среднеквадратичных межслойных шероховатостей границ раздела, приблизительно 10% от толщины самого слоя.

Магнитные свойства многослойных тонких пленок и сверхрешеток на основе Fe/MgO/Gd и Gd/MgO/Fe были измерены на лабораторном вибрационном магнитометре при комнатной температуре.

На рисунке 1.1.14.16 представлены петли гистерезиса, полученные от всех 6 сверхрешеток в серии (образцы № 9 – 14) в магнитном поле, приложенном в плоскости образца. Как видно из приведенного графика, основная часть петель гистерезиса имеет характерную для подобных структур форму. Существенное отличие в форме петли наблюдается только у сверхрешетки glass//Nb(20 нм)/[Fe(5 нм)/Gd(5 нм)]₆/Nb(5 нм) (образец №9). Также, стоит отметить различную величину магнитных полей насыщения в сверхрешетках со слоями MgO различной толщины и без них. Установлено, что величина намагниченности насыщения меняется в диапазоне от 150 до 210 Гс×см³/г и уменьшается с уменьшением толщины слоя MgO.

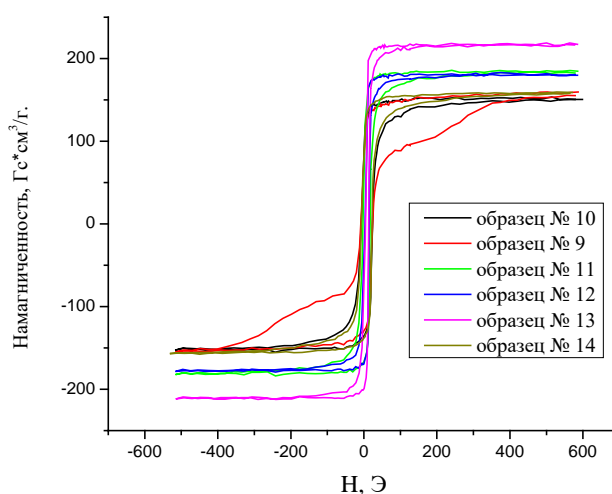


Рисунок 1.1.14.16 -Петли гистерезиса для образцов № 9 – 14

На рисунке 1.1.14.17 показаны две петли гистерезиса, соответствующие сверхрешеткам без слоев MgO: glass//Nb(20 нм)/[Fe(5 нм)/Gd(5 нм)]₆/Nb(5 нм) - образец 9 (черный) и glass//Nb(20 нм)/[Gd(5 нм)/Fe(5 нм)]₆/Nb(5 нм) – образец № 10 (красный). Структуры вышеуказанных образцов полностью идентичны, отличаются исключительно последовательностью слоев железа и гадолиния, однако имеют явное различие в форме петель гистерезиса.

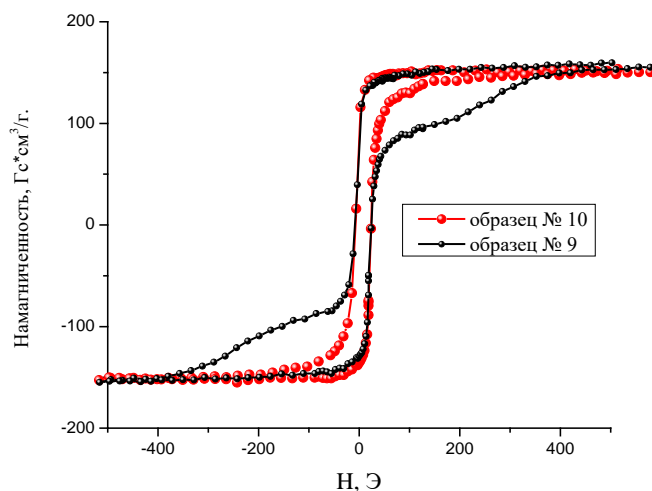


Рисунок 1.1.14.17 - Петли гистерезиса для образцов №9 и №10

С развитием спинтроники изучение поведения кислорода в металлических многослойных слоях становится особенно важным, поскольку его взаимодействие с атомами металла создает сложные эффекты орбитальной гибридизации, влияющие на формирование магнитных свойств [1.1.14.1-1.1.14.2]. Как показали недавние исследования, этим процессом можно управлять, помещая оксиды простых металлов (MgO , Al_2O_3) между металлическими слоями [1.1.14.3-1.1.14.4]. Можно ожидать, что расположение этих оксидных слоев относительно различных типов металлических слоев и их толщина будут влиять на эффекты миграции ионов кислорода из барьерных оксидных слоев и в конечном итоге определять сложные магнитные конфигурации мультислоев. Для исследования процессов миграции ионов кислорода в исследуемых системах были проведены измерения рентгеновских фотоэлектронных спектров (основные уровни XPS и валентные зоны) мультислоев, содержащих Fe (1 нм) и Gd (1 нм), разделенных барьерным оксидным слоем MgO толщиной 0.4, 0.8, и 1.2 нм, покрытые защитным слоем Nb (3 нм) для предотвращения окисления на воздухе. На основании измерений XPS-спектров с высокоэнергетическим разрешением и их сравнения со спектрами эталонных образцов сделан вывод, что независимо от взаимного расположения и толщины барьерного оксидного слоя по отношению к металлическим слоям разного типа, наблюдается преимущественное окисление гадолиния и железа.

XPS-измерения проводились с использованием спектрометра PHI XPS Versaprobe 5000 с высоким пространственным и энергетическим разрешением (ULVAC Physical Electronics, США). В этом спектрометре используется классическая рентгенооптическая схема со сферическим кварцевым монохроматором и анализатором энергии, работающими в диапазоне энергий связи от 0 до 1500 эВ, а также система электростатической фокусировки и магнитного экранирования. Достигнутое энергетическое разрешение составляло $\Delta E \sim 0,5$ эВ с источником $Al K\alpha$, а размер пятна

составлял 200 мкм. Двухканальный нейтрализатор использовался для компенсации локальной зарядки исследуемого образца из-за потери фотоэлектронов. Все исследуемые образцы предварительно выдерживались в вакуумной камере в течение 24 часов при роторной вакуумной откачке и измерялись при давлении 10^{-7} Па. Типичное отношение сигнал/шум составляло не менее 5000. Обработка спектров производилась с помощью ULVAC PHI программное обеспечение MultiPak 9.2. Спектры XPS были откалиброваны относительно эталонного значения энергии основного уровня углерода 1s при 285,0 эВ.

Для корректного изучения влияния миграции ионов кислорода из барьерного слоя MgO на окисление металлов в многослойных структурах необходимо было исключить влияние кислорода на эти процессы со стороны верхнего защитного слоя окисленного ниобия. Как следует из спектров, представленных на рис. 1а, на поверхности образца glass//Nb/Gd/Fe/Nb после воздействия воздуха образуется окисленный слой Nb-O. После травления ионами аргона при $V = 500$ В и $I = 15$ мА в течение 9 минут этот слой полностью исчез, позже этот режим травления был использован для исследования образцов Nb/Fe/MgO/Gd/Nb и Nb/Gd/MgO/Fe/Nb. На рис. 1.1.14.18 представлены XPS Fe 3s-Mg 2s-спектры glass//Nb/Gd/4MgOFe/Nb, которые показывают увеличение относительного содержания Mg/Fe для $n = 0.4, 0.8$ и 1.2 нм в образце стекло/Nb/Gd/MgO/Nb в соответствии с толщиной барьерного слоя MgO.

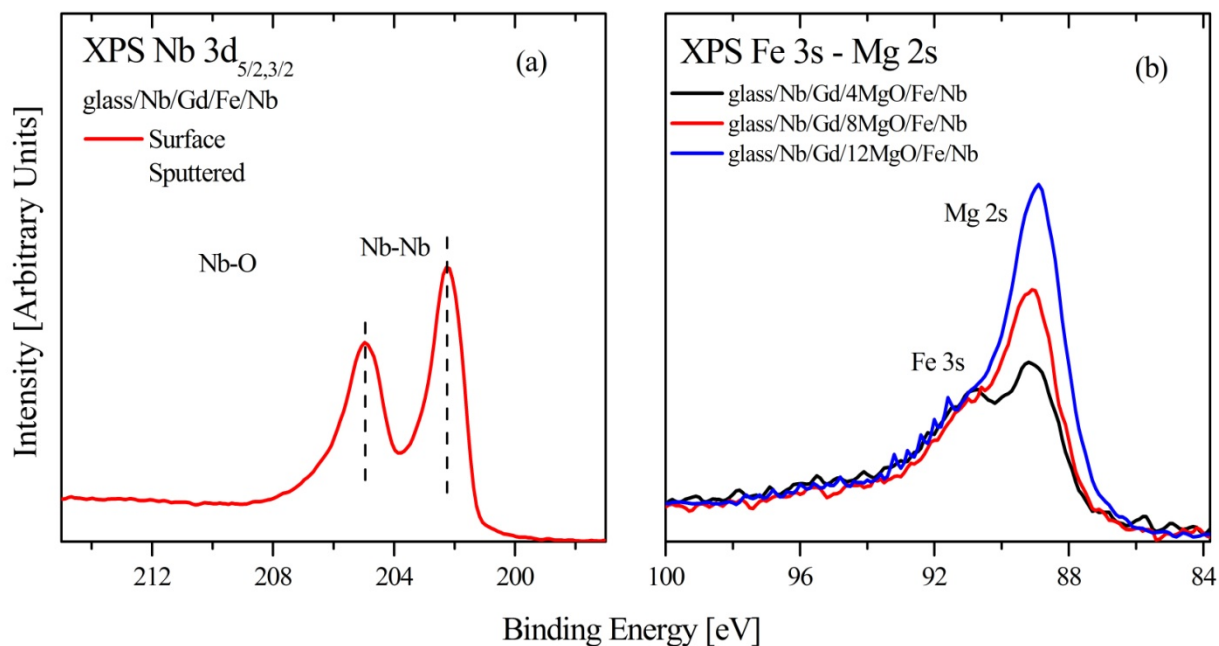


Рисунок 1.1.14.18 - XPS Nb 3d (а) стекло/Nb/Gd/Fe/Nb с поверхности и после ионного травления и (б) XPS Fe 3s-Mg 2s-спектры стекло/Nb/Gd/MgO/Nb для $n = 0.4, 0.8$ и 1.2 нм.

На рисунке 1.1.14.19 представлены обзорные спектры XPS образцов glass//Nb/Gd/Fe/Nb (а) и glass//Nb/Gd/1.2MgO/Fe/Nb, измеренные в диапазоне энергий 0-700 эВ до и после Ag-ионное травление.

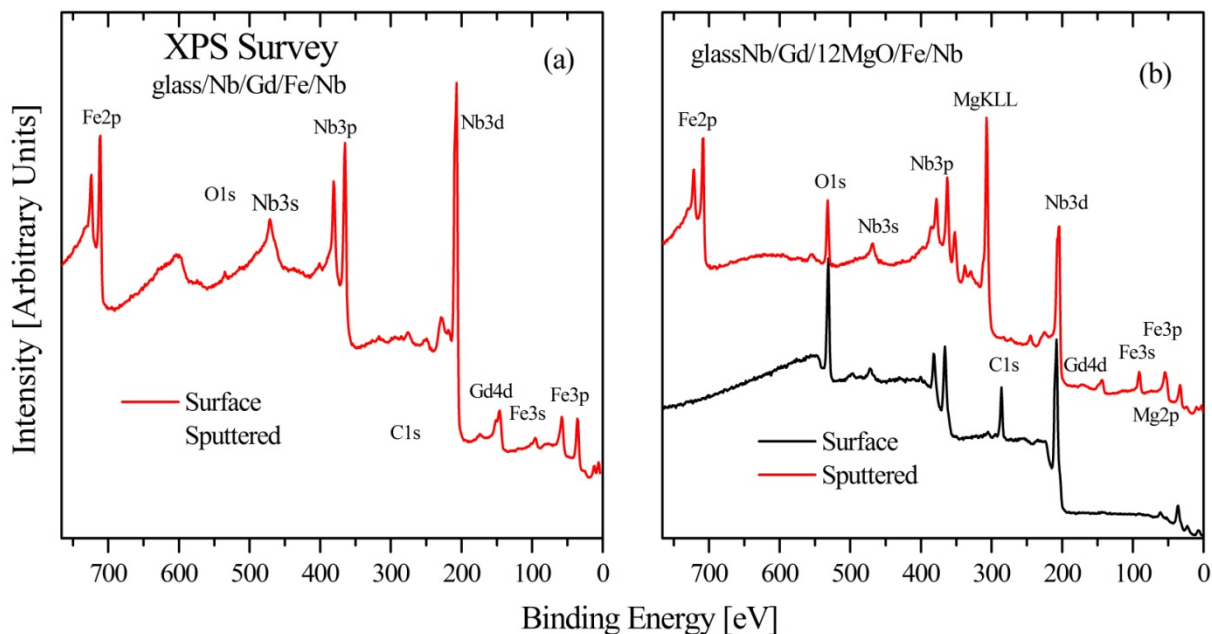


Рисунок 1.1.14.19 - Обзорные XPS-спектры glass//Nb/Gd/Fe/Nb (а) и glass//Nb/Gd/MgO1.2/Fe/Nb (б).

Образец	C	O	Gd	Fe			
					b	g	i
Образец № 5 (Surf)	39,5	41	1,7	0,1	6,9		0,8
Образец № 5 (Sputt)		14	11,5	26,9	7,6		
Образец № 6 (Surf)	29,1	49,9		0,1	0,9		
Образец № 6 (Sputt)	1,5	25,4	8,4	6,3	1,2	7,2	
Образец № 7 (Surf)	30,8	48,2		0,2	0,8		
Образец № 7 (Sputt)	1,8	30	7,6	0,2	5	5,4	

Образец № 8 (Surf)	39,8	42,5		0,2	7,5		
Образец № 8 (Sputt)	4,4	32,6	2,9	2,1	2,4	5,6	
Образец № 2 (Surf)	42,7	38,7	1,1		5,5		
Образец № 2 (Sputt)		31,6	18,4	4,9	9,6	5,5	
Образец № 3 (Surf)	42,7	38,6	1,4		6,5		0,8
Образец № 3 (Sputt)	1,4	32,7	16,8	4,8	4,6	9,7	
Образец № 4 (Surf)	40,8	39,3	1,7		8,2		
Образец № 4 (Sputt)	1,7	37,2	12,2	8,5	0,7	9,7	

Таблица 1.1.14.3 Состав поверхности образца glass//Nb/Gd/Fe/Nb, glass/Nb/Gd/nMgO/Fe/Nb и glass/Nb/Fe/nMgO/Gd/Nb (n = 0.4, 0.8 и 1.2 нм) от поверхности и после ионного травления (в ат.%).

Эти данные наглядно демонстрируют, что из-за ограниченной глубины анализируемого слоя в методе XPS (50 А) выбранный режим травления аргоном оказался очень эффективным не только для удаления верхнего оксидного слоя в образце glass//Nb/Gd/Fe/Nb (рисунок 1.1.14.19а), но также позволял регистрировать сигналы от низколежащих слоев металлов (Fe и Gd) и оксида магния (рисунок 1.1.14.19б). Полный состав образцов glass//Nb/Gd/Fe/Nb, glass//Nb/Gd/nMgO/Fe/Nb и glass//Nb/Fe/nMgO/Gd/Nb (n = 0.4, 0.8 и 1.2 нм) с поверхности и после ионного травления (в ат.%) приведен в таблице 1.1.14.3.

Высокоэнергетические разрешенные XPS-спектры Gd 4d и Fe 2p glass//Nb/Gd/Fe/Nb, glass//Nb/Gd/MgO/Fe/Nb и glass//Nb/Fe/MgO/Nb для n = 0.4, 0.8 и 1.2 нм по сравнению со спектрами эталонных образцов (Gd, Gd₂O₃, Fe, FeO и Fe₂O₃) показаны на рисунках 1.1.14.20 и 1.1.14.21 соответственно.

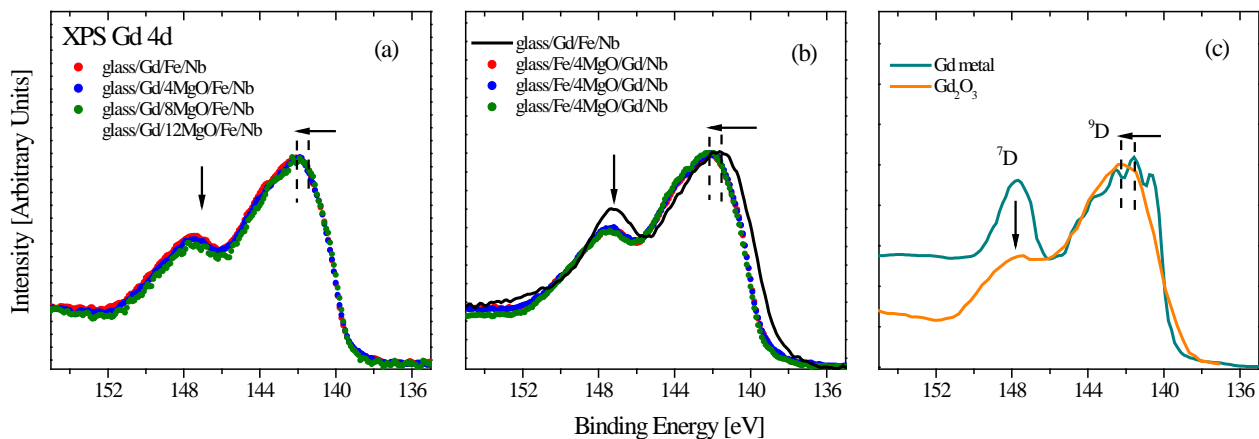


Рис. 1.1.14.20 XPS Gd 4d glass//Nb/Gd/Fe/Nb, glass//Nb/Gd/MgOn/Fe/Nb и glass//Nb/Fe/MgOn/Nb ($n = 0.4, 0.8$ и 1.2 нм) по сравнению со спектрами эталонных образцов (Gd [1.1.14.5], Gd₂O₃ [1.1.14.6]).

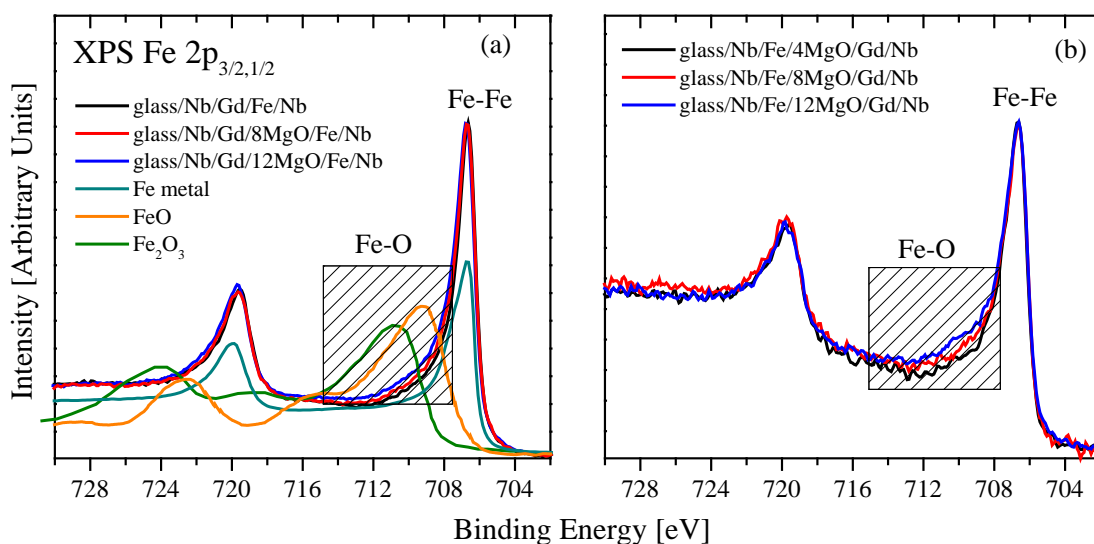


Рисунок 1.1.14.21 - Fe 2p-спектры XPS glass//Nb/Gd/Fe/Nb, glass//Nb/Gd/ MgOn/Fe/Nb и glass//Nb/Fe/MgOn/Nb ($n = 0.4, 0.8$ и 1.2 нм) и спектры эталонных образцов (Fe [1.1.14.5], FeO, Fe₂O₃ [1.1.14.7]).

4d-спектры XPS Gd в металле и оксиде различаются энергетическим положением и вкладом термов D7 и D9 (Рисунок 1.1.14.20 б). Аналогичное поведение XPS Gd 4d-спектров в образцах glass//Nb/Gd/MgOn/Fe/Nb и glass//Nb/Fe/MgOn/Nb ($n = 0.4, 0.8$ и 1.2 нм) (рисунок 1.1.14.20 а-б) позволяет сделать вывод, что ионы кислорода мигрируют из барьерного слоя MgO и индуцируют образование связи Gd-O. Как оказалось, относительное положение Gd относительно MgO в многослойных слоях совершенно неважно для предпочтительного окисления слоя Gd. С другой стороны, сравнение XPS-спектров Fe 2p, измеренных в тех же образцах, со спектрами оксидов (FeO

и Fe_2O_3) не показало никаких признаков окисления (рисунок 1.1.14.21 а и 1.1.14.21 б), поэтому сравнение представленных XPS Gd 4d и Fe 2p-спектры со спектрами контрольных образцов показывают, что в образцах glass//Nb/Gd/Fe/Nb, glass//Nb/Gd/MgO/Nb и glass//Nb/Fe/MgO/Nb ($n = 0.4, 0.8$ и 1.2 нм), отличающихся взаимным расположением слоев Gd и Fe относительно барьерного слоя MgO, имеет преимущественное окисление Gd и следы окисления Fe.

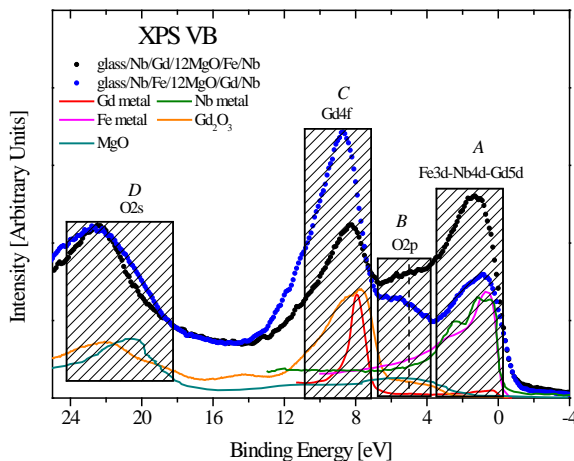


Рисунок 1.1.14.22 - Сравнение спектров XPS VB glass//Nb/Gd/Fe/Nb, glass//Nb/Gd/MgO 1,2нм/Fe/Nb и glass//Nb/Fe/MgO 1,2нм/Nb со спектрами эталонных образцов (Gd [1.1.14.5], Nb [1.1.14.8], Fe [1.1.14.9], Gd₂O₃ [1.1.14.6] и MgO).

На рисунке 1.1.14.22 представлено сравнение рентгеновских фотоэлектронных спектров VB образцов glass//Nb/Gd/MgO 1,2нм/Fe/Nb и glass//Nb/Fe/MgO 1,2нм/Nb, различающихся положением Gd относительно барьерного слоя MgO. Сравнение этих спектров со спектрами эталонных образцов показывает, что вблизи верха валентной зоны в диапазоне энергий 0-3,5 эВ (А) гибридизированные 5d-состояния Fe 3d-Nb 4d-Gd сконцентрированы, тогда как в нижней части валентная зона (D) в состояниях O 2s 18-24 эВ расположена. Между этими двумя крайними особенностями есть две подзоны, В и С, которые мы приписали вкладам O 2p и Gd 4f-состояний соответственно из-за их соответствия энергии связи аналогичным вкладам в оксидах Gd₂O₃ и MgO. Тот факт, что расположение MgO относительно металлических слоев и его толщина (1.2 нм) одинаковы в исследуемых образцах, мы нормировали на рис. 1.1.14.22 их XPS-спектры валентной полосы на интенсивность O 2s-линии. При таком сравнении оказалось, что вклады Fe 3d-Nb 4d-Gd 5d и Gd 4f-состояний в областях А и С в образце glass//Nb/Gd/MgO 1,2нм/Fe/Nb и glass//Nb/Fe/MgO 1,2нм/Gd/Nb исследуемые образцы существенно различаются. В области А вклад 5d-состояний Fe 3d-Nb 4d-Gd значительно выше для образцов glass//Nb/Gd/MgO 1,2 нм/Fe/Nb, чем для образцов glass//Nb/Fe/MgO 1,2нм/Gd/Nb, что неудивительно, поскольку слой железа в образце

glass//Nb/Gd/MgO 1,2нм/Fe/Nb находится ближе к покрывающему слою ниобия. С другой стороны, вклад 4f-состояний Gd из образца glass//Nb/Fe/MgO 1,2нм/Gd/Nb преобладает в области С, поскольку в этом образце слой Gd расположен ближе к защитному слою ниобия.

В заключение, мы изучили влияние межфазной миграции ионов на окисление Fe и Gd в многослойных структурах Nb/Fe/MgO/Gd/Nb и Nb/Gd/MgO/Fe/Nb. Полученные результаты показали высокую эффективность рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии для изучения этого эффекта благодаря атомной селективности метода и его высокой чувствительности к зарядовому состоянию возбужденных атомов. В этой работе было продемонстрировано, что Gd в мультислоях окисляется преимущественно за счет миграции ионов кислорода из барьерного слоя MgO, чем железа, независимо от относительного положения этих металлов по отношению к оксиду в многослойных структурах.

Выполненные работы и полученные в ходе их выполнения результаты полностью соответствуют Техническому заданию и Плану-графику работ, выполняемых в рамках реализации исследовательской программы (проекта) (Приложение № 8 к Соглашению о предоставлении субсидии от 13 октября 2021 г. № 075-10-2021-115). Исследования были выполнены молодыми учеными ИФМ УрО РАН в возрасте до 39 лет Е.М. Якуниной, Д.И. Девятериковым и И.С. Жидковым.

Приложения

1. Акт синтеза образцов. Файл Прилож.1.1.14_1.pdf
2. Отчет по структурной и магнитной характеристике. Файл Прилож.1.1.14_2.pdf

1.1.15 Разработка конструкции блока детекторов для дифрактометра «СФЕРА» (молодые исследователи ИЯИ РАН. Договор 400/1983 от 23.11.2021).

В рамках этой работы разработана ЭКД на конструкции блока детекторов для дифрактометра «СФЕРА». Назначение и область применения разрабатываемого изделия Конструкция блока детекторов для дифрактометра сфера служит для регистрации рассеянного нейтронного излучения.

Технические характеристики

- Размер активной зоны каждого детектора не менее 5x50мм
- Чувствительность к гамма-фону - не более 1×10^{-7}
- Быстродействие детектора - не менее 1×10^6 нейтронов/сек
- Высокая радиационная стойкость и время жизни, снижение эффективности регистрации нейтронного излучения- не более 0,01% в сутки

Выбор базовой конструкции детекторов основывается на создании многокольцевой системы регистрации нейтронов с количеством колец не менее 5:

- 1) высокая эффективность регистрации (50–90%) в широком диапазоне длин волн падающего излучения;
- 2) стабильность рабочих характеристик в процессе эксплуатации в течение длительного времени;
- 3) низкий уровень собственных шумов и низкая чувствительность к гамма-излучению;
- 4) большой ресурс работы детектора без необходимости технического обслуживания;
- 5) надежность и простота обслуживания.

В качестве базового детектора был выбран сцинтиляционный детектор с органическим световодом и кремниевым фотоумножителем. Общая схема детектора показана на рис.1.1.15.1.

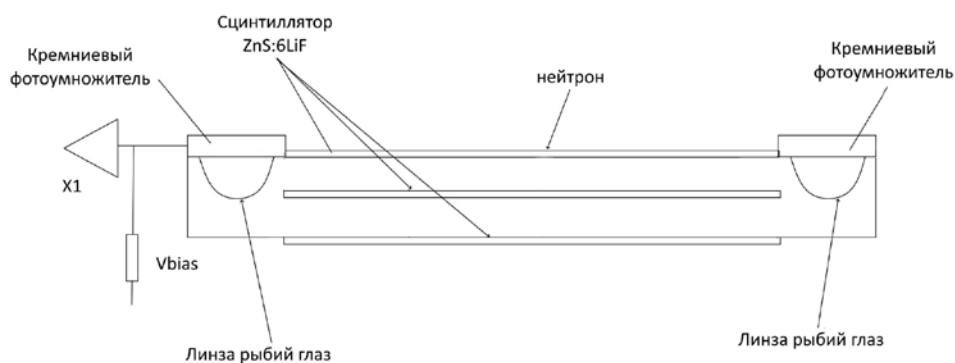


рис. 1.1.15.1. Общая схема детектора

Основываясь на результатах моделирования и оптимальной цены-эффективности был выбран вариант 3-слойного детектора с 3мя слоями нейтроночувствительного сцинтилятора ZnS(Ag):LiF эффективностью не менее 40%.

Детектор представляет из себя композитную систему из сцинтиллятора-световода и кремниевого фотоумножителя. В качестве световода используется оптически прозрачный материал оргстекло. Для сбора фотонов используется кремниевый фотоумножитель (SiPM). Сцинтиллятор приклеен к световоду с помощью оптического цемента. На концах детектора непосредственно перед SiPM вырезаны линзы типа «Рыбий глаз», которые заполняются оптическим клеем и на них им же крепятся 2 SiPM. Для светоизоляции и увеличения светосбора готовый детектор оборачивается фторопластовой лентой. Общий вид детектора показан на рис. 1.1.15.2.

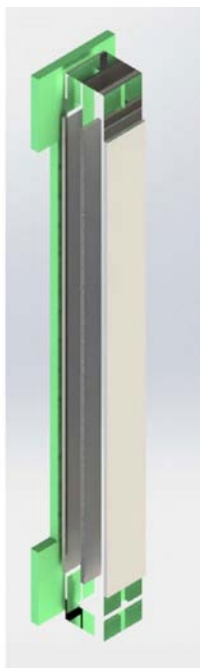


Рис. 1.1.15.2 – Общий вид детектора.

Конструкция данного типа сцинтилляционного детектора обладает следующими преимуществами:

- высокая радиационная стойкость и широкие возможности отбора необходимых для создания детектора материалов;

- высокие эксплуатационные свойства с возможностями мониторинга и стабилизации рабочих параметров;

- простота изготовления детекторов различных форм и размеров.

Регистрации нейтронов происходит следующим образом. Нейтрон, попав в сцинтиллятор вызывает вспышку света, которая распространяется по все стороны по световоду и регистрируется в объеме SiPM. Исходя из результатов моделирования было выбрано 7 колец, расположенных на углах 150-120-105-90-75-60-20 градусов. На угле 20 градусов исходя из результатов моделирования рекомендуется крепить детекторы перпендикулярно падающему пучку что позволит увеличить

эффективность. Таким образом достигается максимальное покрытие по углу детектирования. Общий вид детектора показан на рис. 1.1.15.3

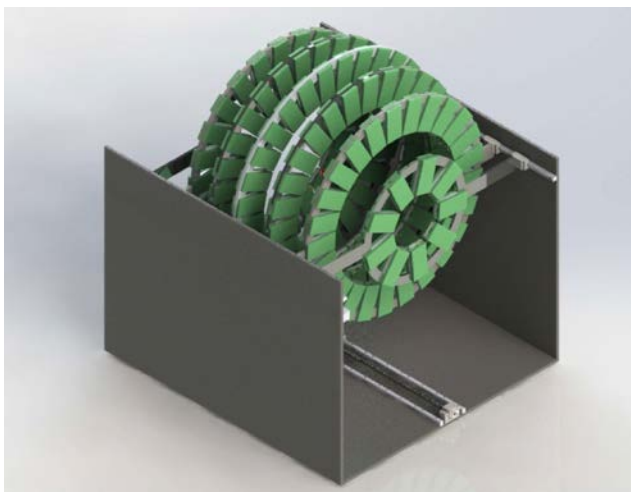


Рис. 1.1.15.3 общий вид детектора сфера

Детекторы располагаются равномерно на кольце с минимально возможным зазором. Таким образом общее количество детекторов на дифрактометр сфера составляет 150 штук. К каждому детектору подводится специально разработанный усилитель формирователь с регулируемым порогом. Исходя из того, что на исходный сигнал от детектора могут приходиться наводки, рекомендуется размещать усилитель-формирователь в непосредственной близости от детектора. Также т. к. усилитель-формирователь не содержит цифровой электроники то он может достаточно стабильно работать в неблагоприятной радиационной обстановке, что позволяет свести к минимуму необходимую защиту.

Модуль предусилителя с детектором рекомендуется сделать универсальным для всех колец, для упрощения производства. В качестве материала корпуса рекомендуется использовать алюминиевую композитную панель. Она обладает следующими преимуществами-легкость прочность, а также т. к. в своем составе содержит полиэтен что обеспечивает дополнительную защиту от нейтронов.

Кольцо, на котором располагаются модули детекторов (рис. 1.1.15.3.) рекомендуется сделать наборным что позволит расширить функциональность устройства, в случае использования дополнительных устройств окружения образца, таких как криостат или высокотемпературная печь. Таким образом в случае использования устройств окружения образца появиться возможность снять верхнюю либо нижнюю часть детекторов для расширения свободного пространства. Общий вид кольца детектора показан на рис. 1.1.15.4.

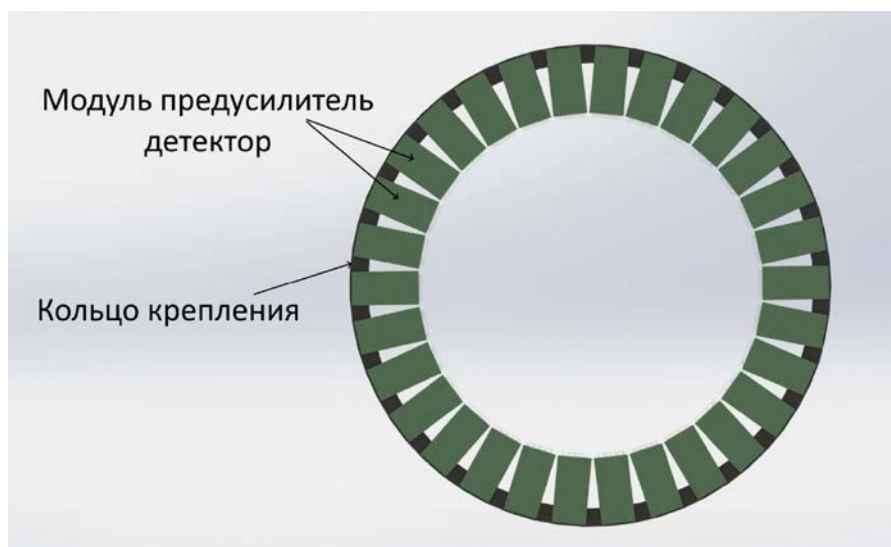


Рис. 1.1.15.4 общий вид кольца детектора

Для расширения функциональных возможностей дифрактометра сфера рекомендуется сделать кольца подвижными что бы возможно было варьировать углы и разрешение. Для этого разработана система на основе 2-х линейных направляющих, расположенных по краям от колец с индивидуальными каретками для каждого кольца. Общий вид этой схемы показан на рис. 1.1.15.5. Линейные направляющие расположены по краям специально для увеличения жесткости крепления колец. В качестве системы перемещения используется либо ручное перемещение, либо реечная передача. Для реечной передачи рейка размещается с одной стороны колец. На каждом кольце размещается шаговый двигатель с зубчатой шестерней для перемещения и концевые выключатели для исключения наезда колец и выставления нулевой точки.

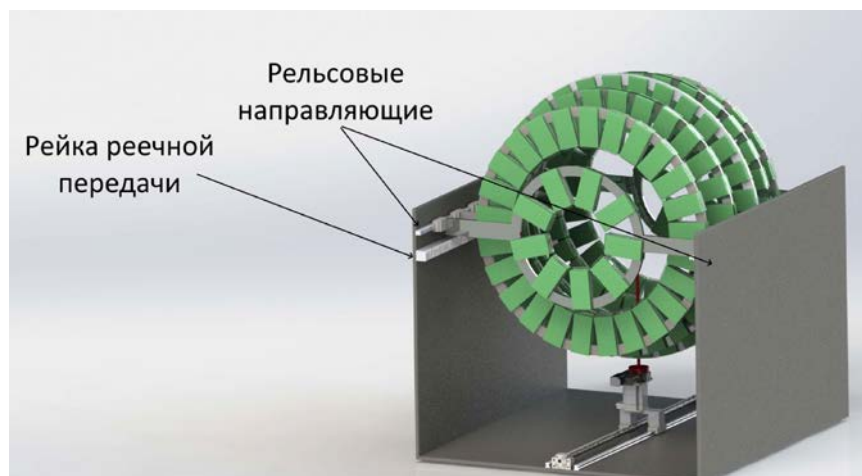


Рис. 1.1.15.5 Общий вид детектора и системы перемещения

Для проведения измерений дифрактометр сфера необходимо оснастить подвижным столом образца, таким образом получится расширить функциональные возможности дифрактометра рис.

1.1.15.6. Для этого используется система из 2-х линейных направляющих и шарико-винтовой передачи с шаговым двигателем и концевыми выключателями для перемещения стола образца.

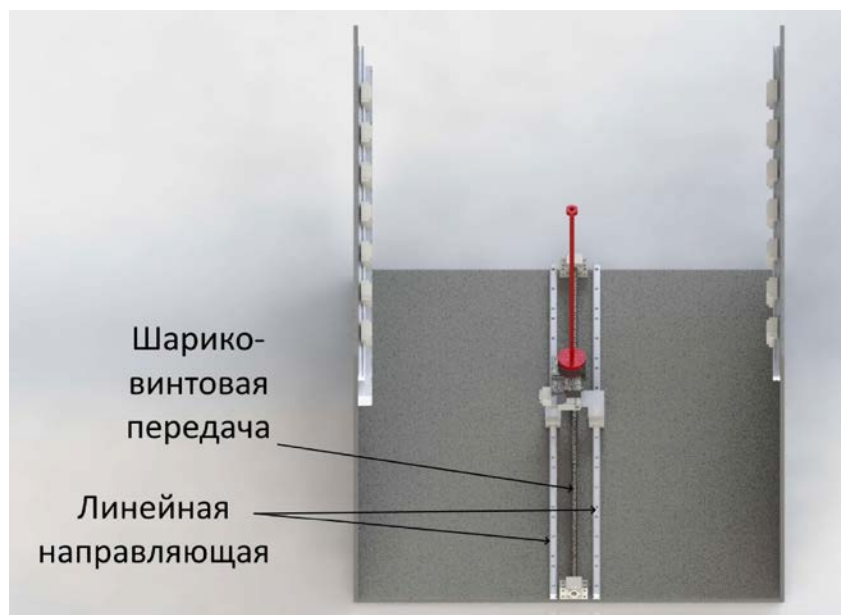


Рис. 1.1.15.6. Общий вид системы перемещения стола образца

Стол образца располагается на каретке шарико-винтовой передачи. В качестве стола образца используются 2 автоматизированных подвижки - перемещение по Z и вращение. (рис. 1.1.15.7) на конце стола образца расположена подставка образца, которая расположена ровно по центру колец

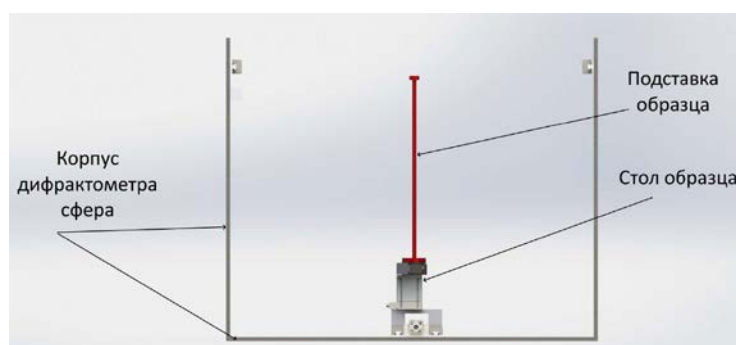


Рис. 1.1.15.7 Общий вид корпуса дифрактометра сфера

Для обеспечения механической жесткости и радиационной защиты необходимо использовать корпусную конструкцию дифрактометра сфера, на которую в случае высоких радиационных фонов возможно установить дополнительную радиационную защиту из кадмия-борированного полиэтилена или свинца.

Таким образом использования 7 колец с общим количеством 3-слойных сцинтилляционных детекторов равным 150 позволит получить достаточную высокую эффективность и покрыть большой телесный угол. Возможность разборной системы колец позволит использовать различные устройства окружения образца. А возможность независимого перемещения как колец, так и стола

образца позволит значительно расширить функциональные возможности дифрактометра и расширить спектр возможных применений.

Приложения

1. Конструкторская документация, в составе: Эскизный проект. Файл Прилож.1.1.15.pdf

1.1.16 Разработка и изготовление высокоэффективного сцинтилляционного счетчика тепловых нейтронов в части (совместно с ИЯИ РАН. Договор 400/1983 от 23.11.2021).

Цель работы — это увеличения эффективности регистрации нейтронов нейтронными детекторами на основе сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя. Это возможно лишь двумя способами. Первый это увеличения эффективности самого сцинтиллятора, второй – это увеличение количества слоев сцинтиллятора. Увеличение эффективности самого сцинтиллятора без увеличения толщины невозможно, а оптимальной толщиной для создания нейтронных детекторов считается 0.5мм т. к. с более толстого сцинтиллятора свет не будет выходить и будет поглощаться самим сцинтиллятором. Максимально доступная на сегодняшний момент эффективность сцинтиллятора 48% фирмы Eljen Technology.

В отличие от первого варианты, второй вариант намного более проще осуществим и для разработки новых высокоэффективных детекторов мы использовали его. При создании детекторов мы использовали сцинтиллятор $ZnS: {}^6LiF(Ag)$ фирмы Saint Gobain эффективностью 42%. В качестве кремниевого фотоумножителя мы использовали SensI тип С размером 3х3 мм.

Общий принцип создания детектора показан на рисунке 1,а . Слои детектора расположены поочередно сцинтиллятор-световод.

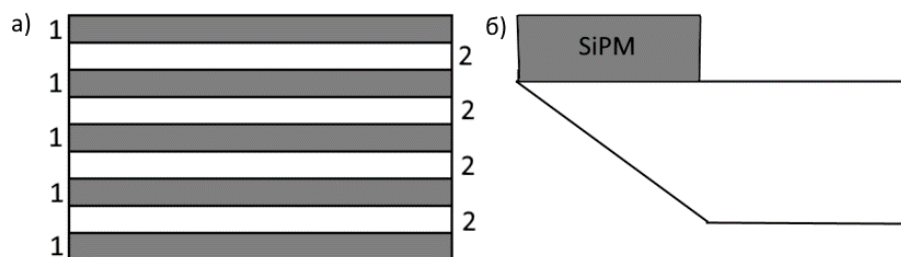


Рисунок 1.1.16.1, принцип построения детектора

В новой версии детектора было принято решение отказаться от линзы типа рыбий глаз и заменить ее срезом на размер SiPM края многослойного детектора рис. 1.1.16.1,б.

В качестве световода для детектора был применен пластик ПТЕ-А. Но возможно использовать абсолютно любой пластик, обладающий достаточной оптической прозрачностью (не менее 92%). Внешний вид детектора представлен на рисунке 1.1.16.2.

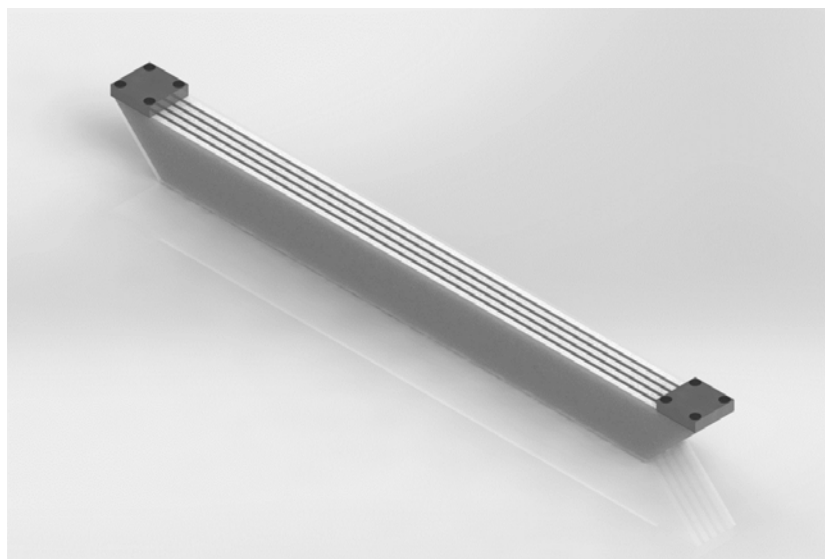


Рисунок 1.1.16.2, модель разработанного детектора.

В качестве тестовых образцов было созданы 5 детекторов с различным количеством слоев сцинтиллятора от 1 до 5. Резка сцинтиллятора и пластика осуществлялась на станке для лазерной резки Raylogic 6040 v12c трубкой Reci мощностью 100 ватт. Склейка сцинтиллятора осуществлялась клеем типа оптический цемент с коэффициентом преломления 1.6. Склейка осуществлялась в камере с возможностью откачки воздуха. Это сделано для того, чтобы в клее не оставалось пузырьков воздуха. Сушка клея производилась в течение 24 часов. Внешний вид части детекторов(2-3-4 слоя сцинтиллятора) без покрытия отражающим слоем изображен на рисунке 1.1.16.3.



Рисунок 1.1.16.3. Внешний вид

В дальнейшем детекторы покрывались со всех сторон слоем из отражающего алюминия, в нашем случае это был Alanod Miro, но возможно использовать и другие, в том числе и химического напыления, главное покрытие должно обеспечивать максимальную отражающую способность.

Таким образом было изготовлено 5 образцов детекторов с количеством слоев сцинтиллятора от 1 до 5.

Приложения.

1. Акт изготовления и сборочный чертеж. Файл Прилож.1.1.16.pdf

1.2. Мероприятия по созданию сетевой синхротронной и нейтронной научно-исследовательской инфраструктуры на территории Российской Федерации

1.2.1 Создание опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкоплёночных бор содержащих покрытий. Очередь 1.

На базе Научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики Объединённого института ядерных исследований началось создание опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкоплёночных бор содержащих покрытий. Целью данного мероприятия является создания участка по исследованию, созданию прототипов устройств на основе тонких слоев бор содержащих соединений для экспериментальных станций на источниках нейтронов, а также проведения обучения и практик по полному циклу производства компонентов экспериментальных станций.

Данный ОЭУ должен выполнять следующие задачи:

- Отработка методик и технологий по нанесению борсодержащих покрытий;
- Создание прототипов устройств (прототипов детекторов, монохроматоров, коллиматоров и других устройств нейтронных спектрометров);
- Исследование и характеристика борсодержащих покрытий и устройств на их основе;
- Проведение практических и лабораторных работ по созданию детекторов нейтронов.

Для решения данных задач выделено помещение 102 корпуса 119 площадки ЛЯП ОИЯИ площадью 550 м². Так как спектр задач широк предложено разделить данное пространство на 5 комнат: вентиляционная, участок хранения материалов и комплектующих, цех сборки и механообработки, участок вакуумного напыления и сборки детекторов и участок тестирования детекторов.

Вентиляционная комната будет являться технической комнатой с ограниченным доступом обслуживающего персонала и предназначена для размещения вентиляционного оборудования корпуса 119 и остальных комнат ОЭУ. Также в данной комнате планируется разместить силовые щиты электропитания ОЭУ и компрессор для обеспечения сжатым воздух цеха и напылительной установки.

Участок хранения материалов и комплектующих предназначен для хранения материалов для детекторов, коллиматоров и других изготавливаемых устройств. Также будет использоваться для временного хранения покупной продукции или элементов, изготовленных внешними подрядчиками. В этой зоне планируется разместить также место хранения готовых устройств или прототипов перед установкой на нейтронные источники.

В цехе сборки и механообработки будет производиться монтажные работы по сборке устройств, слесарная обработка, изготовление деталей с помощью фрезерной и токарной обработки, шлифовки, выполнение первичной подготовки подложек для напыления, раскрой листового материала.

Участок вакуумного напыления и сборки детекторов предполагает создание чистой зоны с пониженным содержанием пыли в воздухе. В данном помещении будут размещены магнетронная напылительная установка, станки для создания строу-детекторов, станки для намотки рамок детекторов, устройства контроля магнетронов и напыленных образцов. Предполагается зона подготовки подложек прошедшие подготовку в механообрабатывающего цехе (мойка в ультразвуковой ванне, очистка плазмой). Предполагается зона сборки детекторов, в которой будут выполняться работы по сборке всех компонентов детектора, пайка и клейка в соответствии с технологической документацией.

Участок тестирования детектора предполагает размещение стенда для проверки детекторов и электроники. Предполагается размещение в данном помещении генератора нейтронов, а также переносного калифорниевского источника нейтронов. Наличие газового оборудования и стоек с различной детекторной электроникой позволит проводить тестирование, настройку, наладку и экспериментальные работы с различными нейтронными детекторами. Совмещение с газовым оборудованием позволит проводить как испытание проточных детекторов нейтронов, так и позволить проводить эксперименты по оптимизации газовых смесей детекторов для улучшения их параметров.

За отчетный период в соответствии с вышеизложенными назначениями помещений ОЭУ была разработана конструкторская документация в рамках раздела Архитектурные решения (АР). Данная конструкторская документация представлена в Приложении. Данная работа была профинансирована с внебюджетного источника (средств ОИЯИ). Также в рамках данного пункта Плана-графика из внебюджетных средств были приобретены материалы для первичных работ по созданию в соответствии с АР чистой зоны (участка вакуумного напыления и сборки детекторов) ОЭУ. Среди них стеновые панели и стыкующий профиль, потолок со светильниками, двери, вентиляционное оборудования. Также для организации чистой зоны в зоне загрузки и выгрузки подложек напылительной установки был приобретен комплекс оборудования для обеспечения класса чистоты ИСО 7. Данное оборудование обеспечит необходимую чистоту для предотвращения порчи очищенных подложек для напыления борсодержащих соединений и предотвратит загрязнение установки магнетронного напыления.

Приложения.

1. Проект реконструкции Разделы: АР (архитектурные решения). Файл Прилож.1.2.1.pdf

1.3 Мероприятия по подготовке специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня

1.3.1 Разработка программы дополнительного профессионального образования (повышения квалификации) "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для специалистов естественнонаучного профиля

(совместно с К(П)ФУ).

Введение

Развитие любой сферы деятельности невозможно без подготовки квалифицированных кадров, отвечающих потребностям современного производства. Внедрение новейших научных разработок в реальный сектор экономики, кроме создания сети центров, оборудованных и приспособленных для решения разного круга задач, должно подкрепляться постоянным притоком новых кадров, а также распространением знаний и новых возможностей среди слоя специалистов, уже имеющих базовое высшее образование. Этой цели следуют большинство программ повышения квалификации.

Несмотря на то, что доля людей, получающих высшее образование, ежегодно увеличивается, общий уровень знаний о физических явлениях, особенно связанных с явлениями и эффектами, вызываемыми ионизирующим излучением, остается слишком низким. Это приводит к тому, что население не только не воспринимает новые технологии, но и порой выступает против их внедрения, тем самым лишаясь явных благ как на уровне процветания экономики государства, так и на уровне социального обеспечения простых граждан. Поэтому программы повышения квалификации с одной стороны должны охватывать как можно более широкий круг слушателей, с другой стороны должна быть градация по области базового образования.

Другой аспект развития внедрения программ дополнительного образования в сфере синхротронных и нейтронных исследований – это концентрация специализированных образовательных учреждений вблизи соответствующих научно-исследовательских центров. И если техническая сторона этой проблемы решается – сеть центров ядерных технологий активно распространяется по стране, то образовательная компонента отстает по ряду понятных причин – маленькая целевая категория, сложное обеспечение учебного процесса и др. В этом плане Казанский федеральный университет обладает достаточным кадровым и материально-техническим потенциалом для того, чтобы не только разработать линейку программ, но и полноценно обеспечить ее реализацию.

Применение современных технологий в промышленности, народном хозяйстве, сфере

обеспечения медицинскими услугами и др. областях, связано обратной связью с развитием самих технологий, их модернизацией, выработкой прорывных решений, т. е. с подготовкой научных кадров и получением результатов мирового уровня.

При проведении работ в рамках первого этапа нами были учтены все вышеперечисленные проблемы и разработали разносторонне охватывающие программы в плане тематики, целевой аудитории и используемых образовательных технологий.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ (ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ) «ПРОВЕДЕНИЕ СИНХРОТРОННЫХ И НЕЙТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»

Программы дополнительного профессионального образования (повышения квалификации), реализуемая ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (далее – КФУ) представляют собой систему нормативных и учебно-методических документов, регламентирующих цели, ожидаемые результаты, содержание, условия, порядок реализации образовательного процесса, оценку качества подготовки слушателей.

Структура программ дополнительного профессионального образования [1.3.1.1]:

- цель, планируемые результаты обучения;
- учебный план;
- календарный учебный график;
- рабочие программы разделов;
- учебно-методические и контрольно-измерительные материалы;
- организационно-педагогические и материально-технические условия.

Учитывая специфику базового образования слушателей, предполагаемый круг решаемых ими задач, разработано три программы (далее – программы ПК) (Приложение А), ориентированных на разные профессиональные группы:

- дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов естественнонаучного профиля;
- дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов биомедицинского профиля;
- дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов археологического профиля.

Программы разработаны на основе квалификационных требований к должности научный сотрудник, содержащихся в Квалификационном справочнике должностей руководителей, специалистов и других служащих (утв. постановлением Минтруда РФ от 21 августа 1998 г. № 37, с

изменениями на 27 марта 2018 г.).

Данные программы предполагают очную форму обучения. Тем не менее в ней заложены элементы, позволяющие при необходимости использовать дистанционные образовательные технологии.

Общая характеристика разработанных программ

В целях соблюдения действующего законодательства [1.3.1.2, 1.3.1.3] программы ПК формируют требования к результатам ее освоения в виде компетенций слушателей программы.

Целью реализации программ является совершенствование и формирование новых компетенций у слушателей программы в рамках имеющейся квалификации:

- знание и умение использовать нормативно-техническую и научно-исследовательскую документацию для получения сведений, необходимых для планирования эксперимента, правильной эксплуатации оборудования, соблюдения техники безопасности при работе с источниками ионизирующего излучения;

- готовность к проведению исследований с использованием синхротронных и нейтронных источников в профессиональной сфере деятельности;

- способность осуществлять анализ, необходимые расчеты и интерпретацию полученных экспериментальных данных.

Основными целями освоения дисциплины являются получение знаний о синхротронном и нейтронном излучениях, технике получения и сферам их применения. Подробно рассматриваются процессы образования изучаемых типов излучений и их регистрация, возможности применения данных излучений для исследования различных видов объектов и трудности, возникающие в процессе регистрации.

В результате освоения программы слушатель должен приобрести следующие знания и умения.

Слушатель должен знать:

- законодательно установленные требования к эксплуатации источников ионизирующего излучения, принципы обеспечения и контроля радиационной безопасности при работе с источниками ионизирующего излучения, способы защиты от различных видов ионизирующего излучения, уровни допустимых доз для персонала;

- типы источников синхротронного и нейтронного излучения, общие принципы их устройства и функционирования;

- какого рода информацию об исследуемом объекте можно получить с помощью синхротронного и нейтронного излучений, границы применимости данных методов, требования к исследуемым объектам.

Слушатель должен уметь:

- определять тип необходимой защиты при работе с различными источниками ионизирующего излучения, оценивать дозиметрические характеристики поля излучения;
- правильно планировать эксперимент на установках синхротронного и нейтронного излучения, подбирать режимы эксперимента для решения конкретной задачи;
- осуществлять анализ и необходимые расчеты для интерпретации полученных экспериментальных данных.

К освоению программы допускаются лица, имеющие высшее образование в одном из профессиональных направлений:

- по естественнонаучным и техническим направлениям (физика, химия, геология, нанотехнологии, материаловедение, энергетика, электро- и радиотехника и др.);
- в области биологии, ветеринарии, медицины и здравоохранения (биология, биомедицина, зоология, клиническая и профилактическая медицина, ветеринария, фармация и др.);
- в области истории и археологии (археология, антропология, этнография, история и др.).

Содержание программ

Учебный план

Перечень разделов и тем, предлагаемых к освоению в рамках учебного плана, представляет собой несколько тематических блоков:

- блок «Радиационная безопасность»;
- блок «Синхротронное излучение»;
- блок «Нейтронное излучение»
- блок «Прикладные исследования».

Наполнение блоков темами осуществлено таким образом, что первые три блока (8 тем) практически в одинаковом содержании входят во все три программы ПК. Четвертый – блок прикладных исследований (2 темы), в каждой программе имеет свое наполнение в зависимости от специализации слушателей (табл. 1).

Опыт реализации программ дополнительного образования по получению и совершенствованию компетенций в области работы с современным экспериментальным оборудованием показывает, что для полноценного освоения программы и закрепления полученных навыков требуется не менее 72 ч. Ввиду того, что обучение происходит с отрывом от производства, именно такой, – минимальный, объем учебной работы был заложен в программу. Четверть от этого объема отдается на самостоятельную работу слушателя (СРС), остальная часть

составляет работу на занятиях, и несколько часов отводится на итоговую аттестацию (табл. 2). Для получения представления о работе синхротронных и нейтронных источников излучения, понимания основ функционирования их основных узлов, большая часть аудиторных часов отводится на лабораторные занятия.

Таблица 1.3.1.1 – Наполнение учебных планов разработанных программ ПК «Проведение синхротронных и нейтронных исследований»

Блок учебного плана	Профиль базового образования обучающихся		
	естественнонаучный	биомедицинский	археологический
Синхротронное излучение	1. Введение. Что такое синхротронное излучение. 2. Вакуумная и низкотемпературная техника в синхротронных и нейтронных установках. 3. Сверхпроводящие магнитные системы. 4. Введение в физику твердого тела. Фундаментальные основы рентгеноструктурного анализа. 5. Основы взаимодействия излучения с веществом. 6. Методы диагностики материалов различных масштабов с использованием синхротронного излучения		
Радиационная безопасность	7. Радиационная безопасность при работе с источниками ионизирующего излучения		
Нейтронное излучение	8. Нейтроны, свойства. Источники нейтронов. Взаимодействие нейтронов с веществом.		
Прикладные исследования	9. EXAFS и XANES спектроскопия. Физические основы и применение. 10. Нейтронные пучки. Нейтронная дифрактометрия и спектроскопия.	9. Применение синхротронного и нейтронного излучения в практической медицине. 10. Применение синхротронного и нейтронного излучения в области биологически наук.	9. Применение синхротронного излучения для археологических исследований. 10. Нейтронные методы в археологии.

Таблица 1.3.1.2 – Трудоемкость учебного плана в разрезе видов занятости обучающегося, ч

Вид работы	Труд оем-	Аудиторные занятия		СРС
		Всего	в том числе	

			лекции	лабораторные	практические	
Учебные часы	68	50	22	28	0	18
Итоговая аттестация	4	4	0	0	4	0
ИТОГО	72	54	22	28	4	18

Календарный учебный график

При формировании графика учебного процесса осуществлено равномерное распределение учебных занятий с понедельника по субботу в соответствии с учетом рационального использования рабочего времени обучающихся и преподавателей, объема и уровня трудности нового материала, чередования и последовательности лекционных и лабораторных занятий, выделения времени на подготовку отчетов по лабораторным работам (табл. 3). Конкретные даты проведения занятий определяются и утверждаются при наборе группы на обучение.

Таблица 1.3.2.3 – График учебного процесса при реализации программ ДПО

Период обучения	Наименование раздела
1 день	Тема 1
2 день	Тема 2
3 день	Тема 3
4 день	Тема 4
5 день	Тема 4
6 день	Тема 5
7 день	Тема 6
8 день	Тема 7
9 день	Тема 8
10 день	Тема 9
11 день	Тема 9
12 день	Тема 10
13 день	Итоговая аттестация

Тематическое наполнение разделов программ осуществлено с учетом потребности обучаемого контингента в тех или иных знаниях и формировании заданных компетенций.

Даются обязательные понятия радиационной безопасности, мер по ее соблюдению, оценке дозовых характеристик, способов и видов защиты от ионизирующего излучения.

Рассматриваются особенности синхротронного и нейтронного излучения, их источники, способы управления пучками, взаимодействие излучения с веществом, способы описания возникающих эффектов, возможности использования в разных сферах деятельности – научных исследованиях и практических применениях.

Организационно-педагогические условия

Задействованные в образовательном процессе помещения для проведения лекционных занятий представляют собой типовые учебные аудитории, оснащенные оборудованием, позволяющим проводить показ презентаций, трансляцию видеоматериала, подключаться к Интернет-ресурсам.

Занятия лабораторного практикума проходят в лабораторных помещениях, оснащенность и условия работы, в которых соответствуют требованиям техники безопасности.

При необходимости обучающемуся предоставляются помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду КФУ.

На время освоения программы ПК обучающемуся предоставляется: конспекты лекций, руководства к выполнению лабораторных работ, доступ к электронным библиотечным ресурсам через сеть КФУ и доступ к библиотечным фондам КФУ. Список источников информации, обеспечивающих образовательную программу, составлен с учетом доступности – либо в библиотечном фонде КФУ, либо через электронно-библиотечную систему сети КФУ. Полный список рекомендованных источников представлен в программах ПК (Приложение А), учебном пособии, руководствах по выполнению лабораторных работ.

Реализация программ ПК обеспечивается научно-педагогическими работниками КФУ, а также лицами, привлекаемыми КФУ на других условиях, ведущими научную, учебно-методическую и (или) практическую работу, соответствующую профилю преподаваемого раздела. Не менее 80 % численности научно-педагогических работников, участвующих в реализации программы ПК, имеют ученую степень (в том числе ученую степень, полученную в иностранном государстве и признаваемую в Российской Федерации) и (или) ученое звание (в том числе ученое звание, полученное в иностранном государстве и признаваемое в Российской Федерации). Кадровый состав, участвующий в реализации программ ПК, представлен авторским коллективом и может отличаться в зависимости от года реализации программ.

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОГРАММ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ (ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ) «ПРОВЕДЕНИЕ СИНХРОТРОННЫХ И НЕЙТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»

Обеспечение теоретического блока

Одно из основных назначений программы дополнительного образования (повышения квалификации) – знакомство слушателей с последними достижениями в рассматриваемой сфере деятельности и соответственно – новыми возможностями, появившимися благодаря этим достижениям. Вторая особенность краткосрочных программ обучения – концентрация информации, которую нельзя получить из одного источника. Поэтому для обеспечения планомерного течения учебного процесса и сокращения времени слушателя на поиски нужной информации, подготовлено учебное пособие, являющееся кратким конспектом лекций и содержащее ссылки на специфические для каждой темы источники информации: Батулин Р. Г., Болтакова Н. В., Дулов Е. Н. и др. Проведение синхротронных и нейтронных исследований: Учебное пособие. – Казань: Казан. ун-т, 2021. – 176 с. (https://drive.google.com/drive/folders/10Hnm6FTeQI5Sq3rXFQU3cohok9gEpE_j).

Подготовлен кейс мультимедийного (аудиовизуального) сопровождения образовательных программ ПК (ссылка для просмотра: <https://drive.google.com/drive/folders/1ovwyyeGGu7maVDBEyew7r0hg6MiAbRdn>). Информация по названию и типу видеоматериалов приведена в таблице 1.3.1.4, где профиль целевой аудитории обозначена как: ЕН – естественнонаучный, БМ – биомедицинский, АИ – археологический.

Назначение мультимедийного кейса – обеспечение эффективности самостоятельной работы по:

- усвоению материала лекций;
- теоретической подготовки, необходимой для качественного выполнения лабораторных работ;
- подготовке к тестированию;
- расширению кругозора и более глубокое понимание прикладного потенциала изучаемых методов.

Деление материалов на профили условно. Каждый слушатель в целях саморазвития может ознакомиться со всеми материалами мультимедийного кейса.

Подготовка мультимедийного кейса проводилась силами творческого коллектива редакции телевизионных и радиопрограмм Медиа-Центра КФУ «Univer» и учебно-практической лаборатории «UNIVER TV» Института социально-философских наук и массовых коммуникаций. Все работы

выполнены с использованием специализированного оборудования и съемочных площадок структурных подразделений КФУ.

Таблица 1.3.1.4 – Состав подготовленного кейса мультимедийного сопровождения

Название	Лектор	Программа ПК		
		ЕН	БМ	АИ
1. Образовательные лекции				
Изучение историко-культурного наследия	декан высшей школы исторических наук и всемирного культурного наследия, д-р ист. наук, проф. Ситдилов А. Г.			+
Взаимодействие нейтронов с веществом»	доцент кафедры физики твердого тела (ФТТ), канд. физ.-мат. наук Дулов Е. Н.	+	+	+
Белковая кристаллография	проф. кафедры медицинской физики, д-р физ.-мат. наук Усачев К. С.	+	+	+
2. Научно-популярные интервью				
Назначение физических методов исследования в материаловедении	директор Института физики (ИФ) КФУ, д-р физ.-мат. наук, Гафуров М. Р.,	+	+	+
Казанская школа ядерного гамма-резонанса	доцент кафедры ФТТ ИФ, канд. физ.-мат. наук Вагизов Ф. Г.,	+		
Казанская школа магнитного резонанса	зав. кафедрой квантовой электроники и радиоспектроскопии ИФ, д-р. физ.-мат. наук Тагиров М. С.	+		
Рентгеноструктурный анализ от минералов до белков	канд. хим. наук, с. н. с. научно-исслед. лаб. «Структурная биология», Исламов Д. Р.	+	+	+
Неразрушающие методы исследования структуры и состава объекта в археологии	декан высшей школы исторических наук и всемирного культурного наследия Института международных отношений КФУ, д-р ист. наук, проф. Ситдилов А. Г.			+
Рентгенографический анализ геологических пород	зав. кафедрой квантовой минералогии и литологии, д-р. геолого-минер. Наук Морозов В. П.	+		+
Белковая кристаллография	проф. кафедры медицинской физики ИФ, д-р физ.-мат. наук Усачев К. С.	+	+	

История развития физики ядра и элементарных частиц	доцент кафедры ФТТ ИФ, канд. физ.-мат. наук Дулов Е. Н.	+	+	+
Использование ядерной энергии в мирных целях	Зам. директора ИФ по образовательной деятельности, доцент кафедры ядерно-физического материаловедения, канд. физ.-мат. наук Болтакова Н. В.	+	+	+

Для предварительного ознакомления с условиями обучения подготовлены видеозаписи по учебным помещениям, задействованным в программах ПК:

- онлайн-лекция из Объединенного института ядерных исследований «Введение в теорию ускорителей» в ауд. 305 ИФ;
- ядерный практикум в лаборатории ядерной физики кафедры ФТТ ИФ КФУ;
- лаборатория научной реставрации Института международных отношений КФУ;
- лаборатория структурной биологии Института фундаментальной медицины и биологии КФУ.

В соответствии с общими тенденциями развития цифрового общества, новых рекомендаций министерства образования РФ, все современные обучающие программы должны соответствовать не только высоким научным и практическим запросам, но и иметь высокую наглядность, демонстрационную составляющую. При организации образовательного процесса следует особое внимание уделять возможностям использования онлайн-формам обучения, реализации образовательных программ в смешанных и дистанционных форматах. В связи с этим подготовленный мультимедийный кейс может служить базой для разработки программ ПК с дистанционным форматом обучения.

Обеспечение лабораторного практикума

В состав лабораторного практикума, обеспечивающего поддержку разработанных программ ПК, входит 10 лабораторных работ различных лабораторных практикумов, функционирующих в рамках обеспечения текущего образовательного процесса. Каждая работа сопровождается руководством к выполнению с приведением краткой теории, описанием установки, алгоритма выполнения работы и обработки полученных данных:

- 1) Исследование линейно-поляризованного света и проверка закона Малюса (https://kpfu.ru/portal/docs/F1884910413/Issledovanie.linejno._polyarizovannogo.sveta.i.proverka.zakona.Maljusa.pdf);
- 2) Получение тройной точки азота (https://kpfu.ru/portal/docs/F_393521741/236.pdf);
- 3) Исследование эффекта Джоуля-Томсона для различных газов (<https://kpfu.ru/portal/docs/F370214929/217.pdf>);

4. Высокотемпературная сверхпроводимость (https://kpfu.ru/docs/F1030230154/LR._531..VTSP.pdf);
5. Определение удельного заряда электрона (https://kpfu.ru/portal/docs/F_885395505/337.pdf);
6. Отражение Брэгга: определение постоянной решетки монокристалла (Cu, Mo анод) (https://kpfu.ru/docs/F1249128539/_541. Otrazhenie. Bregga. opredelenie. postoyannoj. reshetki. monokristallov.pdf);
7. Определение постоянной решетки кубической сингонии методом Дебая-Шерера (https://kpfu.ru/docs/F2143828790/_542..Opredelenie.postoyannoj.reshetki.kubicheskoi.singonii.metodm.Debaya_Sherera._poroshka_.pdf);
8. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом. Рентгеноструктурный анализ (https://kpfu.ru/portal/docs/F_1286696692/metod.posobie.Specpraktikum.pdf);
9. Закон Мозли и определение постоянной Ридберга (https://kpfu.ru/docs/F1428207156/_572...Zakon.Mozli.i.opredelenie.postoyannoj.Ridberga.pdf);
10. Нейтронно-активационный анализ (<https://kpfu.ru/docs/F1050080452/nejtronnaya.aktivaciya.pdf>).

Современные технологии предоставляют широкий спектр инструментов для цифровизации процесса обучения. Особый интерес представляет цифровизация и автоматизация трудоёмких процессов и сложных в воспроизведении структур.

Одним из трудоёмких процессов может выступать проведение экспериментов с участием радиоактивных элементов. Необходимость содержать специальную лабораторию и сложное оборудование при учебном заведении может стать препятствием к качественному образованию студентов и получению полноценного академического опыта.

Создание виртуальных лабораторий может стать решением этой проблемы. Эксперименты в виртуальной лаборатории можно повторить необходимое количество раз без химических элементов, оборудования и даже без участия преподавателя.

Дополнительным преимуществом цифровой визуализации экспериментов выступает возможность отразить процессы более подробно. Некоторое оборудование невозможно рассмотреть изнутри в реальности, в то время как виртуальное оборудование не ограничивает студентов в исследованиях.

Лаборатория Digital Media Lab, в которой проводилась разработка приложения, занимается преимущественно разработкой различных видеоигр с использованием движков Unity и Unreal Engine. Лаборатория визуализации и разработки игр является лабораторией Института информационных технологий и интеллектуальных систем КФУ. Основные сферы деятельности:

- разработка компьютерных, мобильных и Web-игр;

- визуальная симуляция производственных процессов;
- проекты с использованием технологий Oculus Rift, Kinect, NettleBox.

Задача, поставленная перед лабораторией в рамках данного проекта – создание приложения для визуализации экспериментов в рамках курса о синхротронных и нейтронных исследованиях. Название приложения – Virtual Laboratory. Приложение выполнено в стилистике реализм. Пользователь может просмотреть один из представленных экспериментов. В настоящее время выполнено два сценария для демонстрации (<http://youtube.com/channel/UCJqS5Ub-XvWUTXaoELg8pPw>):

- определение периода полураспада нуклидов;
- рентгеноструктурный анализ белка.

Во время демонстрации пользователя сопровождают комментарии закадрового голоса о происходящем на сцене. Во время воспроизведения эксперимента пользователь может остановить движение сценария и перейти в режим свободного перемещения по сцене.

Для разработки приложения использовался движок Unity. Команда состояла из нескольких разработчиков, моделлеров и проектного менеджера. Некоторые разработчики выполняли роль тестировщиков.

Перечень работ, необходимых для разработки ключевого функционала приложения:

- создание 3D-моделей окружения (комната лаборатории, стол, источники освещения);
- создание 3D-моделей для экспериментов (дифрактометр, источник нейтронов, линейка, пипетки, белок, шприц и т. д.);
- текстурирование 3D-моделей;
- запекание света и настройка постпроцессинга на сцене;
- создание главного меню и пользовательского интерфейса;
- внедрение возможности выбора эксперимента для просмотра;
- разработка системы с двумя режимами воспроизведения эксперимента;
- реализация сценариев экспериментов;
- запись и внедрение звуковых файлов;
- тестирование и подготовка установочного файла приложения.

При разработке сценария были использованы фотографии и видеозаписи работы реального оборудования, были сняты настоящие показатели датчиков и получены комментарии от практикующих преподавателей КФУ. С помощью методических пособий были разработаны два сценария с перечнем необходимых моделей, а также описанием визуального и звукового рядов. Далее представлено краткое описание и табличное представление каждого сценария.

Для создания моделей использовался Blender 3D. Blender – это профессиональное, свободное и открытое программное обеспечение для создания трёхмерной компьютерной графики,

включающее в себя средства моделирования, скульптинга, анимации, симуляции, рендеринга, постобработки и монтажа видео со звуком, компоновки с помощью «узлов» (Node Compositing), а также создания 2D-анимаций. В настоящее время пользуется большой популярностью среди бесплатных 3D-редакторов в связи с его быстрым стабильным развитием и технической поддержкой. В процессе обсуждения был выбран стиль реализм, то есть модели имеют достаточное количество полигонов, используются PBR-материалы.

Для создания реалистичного освещения, а также оптимизации потребления ресурсов компьютера было решено использовать смешанный тип освещения. Для этого на сцену было добавлено пять источников света для статичных объектов, а также один источник для создания теней в реальном времени. Источники света расположены в местах потолочных светильников лабораторной комнаты. После этого статичные объекты на сцене были помечены свойством `static`, чтобы запечь статичный свет на эти объекты.

После этого свет запекался на статичные объекты и в результате создавались карты освещения. Карта освещения — метод освещения пространства в 3D-приложениях, заключающийся в том, что создается текстура (рис. 1.3.1.1), содержащая информацию об освещенности трехмерных моделей. Также было подобрано разрешение карт освещения для обеспечения оптимального качества. В итоге были получены наборы запеченных карт освещения для двух сцен.

В приложение был добавлен постпроцессинг, для повышения реалистичности и качества картинки, которую пользователь видит на экране. Был создан и настроен специальный профиль постпроцессинга, который улучшил цвета, контрастность, свечение, поверхностное затенение, экспозицию, насыщенность (рис. 1.3.1.1).

Разработано образовательное приложение для компьютеров, управляемых операционной системой Windows. Программный продукт позволяет демонстрировать обучающие визуализации реальных экспериментов.



Рисунок 1.3.1.1. – Сцена без (а) и с (б) постпроцессингом

Фонд оценочных средств

Оценка итоговой аттестации (максимум 100 баллов) складывается из оценки, полученной в результате текущего контроля знаний (максимум 40 баллов) и промежуточного тестирования (максимум 60 баллов).

Такая система оценки знаний разработана с учетом того, чтобы она отвечала оценке сформированности целевых компетенций.

Текущий контроль успеваемости осуществляется в виде приема отчета по выполненным лабораторным работам. Требования к содержанию и оформлению отчета приводятся в руководствах по выполнению лабораторных работ, а также сформулированы в отдельных приложениях к программам ПК – входят в состав фонда оценочных средств (Приложение Б).

Промежуточная аттестация – экзамен в форме тестирования по всем разделам программы ДПО. Для объективной оценки знаний и охвата всех тем программы, сформирован банк тестовых заданий: всего 140 заданий с тремя вариантами ответов, один из которых правильный. Полный набор заданий приведен в составе фонда оценочных средств (Приложение Б).

Программа считается освоенной при наборе слушателем не менее 50 баллов по результатам итоговой аттестации. В случае набора менее 50 баллов слушателю предоставляется возможность повторно пройти итоговое тестирование для набора достаточного количества баллов для успешной аттестации. Всего на прохождение тестирования предоставляется три попытки в течение пяти дней, следующих за последним днем обучения.

В случае неудовлетворительных результатов итоговой аттестации слушатель может пройти повторную аттестацию только при повторном обучении по данной программе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена работа по анализу информации о современном состоянии дел в области синхротронных и нейтронных источников излучений. Произведена систематизация методов исследования по типу излучения, по сфере применения, по типу исследуемых объектов. Широкий охват сфер применения говорит о большом потенциале синхротронных и нейтронных методов, о необходимости внедрения образовательных программ на уровне повышения квалификации различных профессиональных категорий.

По итогам проведенной работы получены следующие результаты.

1. Подготовлено три программы (Приложение А), ориентированных на разные профессиональные группы:

- дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов естественнонаучного профиля;
- дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов биомедицинского профиля;
- дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов археологического профиля.

2. Разработаны:

1) учебные планы образовательных программ (в составе программ, Приложение А);

2) оценочные материалы (в составе фондов оценочных средств, Приложение Б);

3) методические материалы:

- учебное пособие;
- научно-популярные интервью (9 эпизодов);
- образовательные лекции (3 лекции);
- ознакомительные видеоэкскурсии (4 эпизода);
- две виртуальные лаборатории.

Результаты могут быть положены в основу дальнейшей разработки рабочих программ дисциплин высшего образования.

Выполненные работы и полученные в ходе их выполнения результаты полностью соответствуют Техническому заданию и Плану-графику работ, выполняемых в рамках реализации исследовательской программы (проекта) (Приложения №№ 1, 2 к Договору от 30» ноября 2021 г. № 400/2008).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[1.3.1.1] Положение о дополнительном образовании в ФГАОУ ВО «К(П)ФУ» / Утв. рект. И. Р. Гафуровым 19.02.2014 г. № 0.1.1.67-06/24/14. – Режим доступа: https://kpfu.ru/docs/F106434081/pol_do_190214.pdf (дата обращения 10.11.2021).

[1.3.1.2] Федеральный закон Российской Федерации «Об образовании в Российской Федерации» от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ (в действующей редакции от 1.09.2021 г.).

[1.3.1.3] Приказ Министерства образования Российской Федерации «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по дополнительным общеобразовательным программам» (с изменениями на 30 сентября 2020 года).

Приложение.

1. Учебный план образовательной программы, оценочные материалы, методические материалы.
Файл Прилож.1.3.1.pdf

1.3.2 Разработка программы дополнительного профессионального образования (повышения квалификации)"Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для специалистов биомедицинского профиля

(совместно с К(П)ФУ. Совместно с К(П)ФУ. Договор 400/2008 от 03.12.2021).

Содержательная часть совпадает с п. 1.3.1.

Приложение.

1. Учебный план образовательной программы, оценочные материалы, методические материалы.

Файл Прилож.1.3.2.pdf

1.3.3 Создание научно-образовательной лаборатории для проведения научно-исследовательские работы студентов и аспирантов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также элементов и систем экспериментальных станций. (Совместно с МФТИ. Договор 400/1984 от 23.11.2021).

В Московском физико-техническом институте совместно с Объединенным институтом ядерных исследований создана научно-образовательная лаборатория перспективных технологий для установок и экспериментов мегасайенс (Лаборатория перспективных технологий мегасайенс, приказ 74-6 от 07.12.2021). В задачи лаборатории будет входит:

- проведение фундаментальных и прикладных научных исследований мирового уровня в области физики, техники и технологий для установок и экспериментов мегасайенс, а также в смежных областях;
- интеграция лаборатории в национальные и международные коллаборации с целью усиления экспертизы в области деятельности лаборатории;
- концентрация на базе лаборатории ведущих ученых и их участие в образовательном процессе МФТИ, включая руководство научно-исследовательской работой студентов, аспирантов, молодых исследователей.

В соответствии с возложенными на нее задачами лаборатория перспективных технологий мегасайенс осуществляет следующие функции:

- выполняет научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, в том числе по заказу предприятий и организаций всех форм собственности, международных организаций;
- привлекает преподавателей и научных работников МФТИ, а также внешних специалистов и экспертов к проведению научно-исследовательских работ на базе Лаборатории;
- выполняет экспертные работы, в том числе обеспечивает участие работников Лаборатории в работе соответствующих рабочих групп и комиссий с участием МФТИ, как государственных, так и неправительственных и международных, по вопросам деятельности Лаборатории;
- участвует в подготовке и проведении научных конференций, семинаров в МФТИ, а также поддерживает и расширяет профильные научные связи, в том числе международные;
- осуществляет подготовку к публикации научных материалов: монографий, статей, отчетов, выступлений, докладов и т.п. в области специализации Лаборатории;
- распространяет посредством Интернета и средств массовой информации научно-просветительскую информацию о результатах научно-исследовательских работ Лаборатории.
- организует семинары и мастер-классы по тематике Лаборатории, в том числе для работников, студентов и аспирантов МФТИ;
- привлекает студентов и аспирантов МФТИ к проведению научно-исследовательских работ на базе Лаборатории;

- содействует установлению устойчивых связей МФТИ с участниками рынка труда в области специализации Лаборатории с целью улучшения возможностей трудоустройства выпускников МФТИ.

В рамках своей деятельности лаборатория принимает участие в мероприятиях Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 – 2027 годы, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 16 марта 2020 г. № 287 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 – 2027 годы»:

а) проведение синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач, в том числе: поддержка научных и научно-технических проектов, выполняемых организациями, в том числе совместно с организациями, действующими в реальном секторе экономики, представителями международного научного сообщества, а также проектов исследователей в возрасте до 39 лет; поддержка разработки и трансфера прорывных технологий, созданных с использованием результатов синхротронных и нейтронных исследований, а также ускорительных, реакторных и ядерных технологий, в том числе в рамках развития ядерной медицины;

б) создание сетевой синхротронной и нейтронной научно-исследовательской инфраструктуры на территории Российской Федерации, в том числе создание и развитие на базе организаций лабораторий и центров, включая центры коллективного пользования, инфраструктуры для хранения, обработки и анализа экспериментальных данных, обеспечивающих ускоренное развитие синхротронных и нейтронных исследований, ускорительных, реакторных и ядерных технологий, в том числе технологий ядерной медицины;

в) подготовка специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня, в том числе: разработка и реализация образовательных программ высшего образования и дополнительных профессиональных программ, направленных на создание прорывных технологических решений с применением синхротронных и нейтронных источников; организация и проведение научных конференций, школ и семинаров для исследователей и обучающихся по направлениям реализации Федеральной программы в возрасте до 39 лет.

К научно-исследовательской работе будут привлекаться обучающиеся физтех-школы физики и исследований им. Ландау МФТИ, в состав которой входит созданная лаборатория и базовая кафедра ОИЯИ «Кафедра фундаментальных и прикладных проблем физики микромира», а также обучающиеся других физтех-школ.

Приложения.

1. Приказ о создании лаборатории. Файл Прилож.1.3.3.pdf

1.3.4 Формирование перечня научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории в 2022г. (Совместно с МФТИ. Договор 400/1984 от 23.11.2021).

В 2022 году будет произведен набор обучающихся из числа студентов и аспирантов физтех-школы физики и исследований им. Ландау МФТИ для участия в научно-исследовательских практиках и выполнении научно-исследовательских работ. С этой целью сформирован и утвержден перечень научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, представленный в таблице:

ФИО	First name, Family name	Scopus ID	Организация / позиция	Наименование темы НИР
Еник Темур Львович	Enik, Temur	7801649876	Объединенный институт ядерных исследований, начальник группы Лаборатории физики высоких энергий им. Векслера и Балдина	Тонкостеночные дрейфовые трубки в экспериментах мегасайнс
Швецов Валерий Николаевич	Shvetsov, Valery	7006599034	Объединенный институт ядерных исследований, директор Лаборатории нейтронной физики им. Франка	Перспективные направления развития детекторов нейтронов

Лычагин Егор Валерьевич	Lychagin, Egor	6602383981	Объединенный институт ядерных исследований, заместитель директора по научной работе Лаборатории нейтронной физики им. Франка	Детекторы ультрахолодных нейтроны. Технологические особенности и области применения
Несвижевский Валерий Викторович	Nesvizhevsky, Valery	6603951863	Institut Laue-Langevin, Grenoble, France,	Ультрахолодные нейтроны как инструмент для изучения фундаментальных свойств нейтронов
Дедович Дмитрий Владимирович	Dedovich, Dmitri	8105593300	Объединенный институт ядерных исследований,	Детекторы ММ. Методы детектирования и конструктивные особенности
Демичев Михаил Андреевич	Demichev, Mikhail	36491284700	Объединенный институт ядерных исследований,	Применение программного пакета ROOT для анализа данных со строу детекторов
Жемчугов Алексей Сергеевич	Zhemchugov, Alexey	56967778500	Объединенный институт ядерных исследований,	Применение пакета Geant4 для описания работы детекторов

Шматов Сергей Владимирович	Shmatov, Sergei	57195761975	Объединенный институт ядерных исследований,	Физика на установках мегасайнс
Боднарчук Виктор Иванович	Bodnarchuk Victor	6601982662	Объединенный институт ядерных исследований,	Установки на ИБР2. Инструмент прикладных нейтронных исследований.

В 2021/2022 учебном году МФТИ по итогам конкурсного отбора получил право на проведение Всероссийской олимпиады студентов «Я – профессионал». по четырем направлениям, включая направление «Физика и технологии уникальных научных установок класса «мегасайнс»» (<https://lpr.mipt.ru/megascience>).

Всероссийская олимпиада студентов «Я – профессионал» проводится для студентов бакалавриата, магистратуры, специалитета российских вузов и направлена на проверку теоретических знаний и прикладных компетенций. Главная цель проекта – поддержка талантливых студентов, которая позволит им продолжить обучение в ведущем российском вузе или начать карьеру. «Я – профессионал» – один из флагманских проектов президентской платформы «Россия – страна возможностей».

Олимпиада «Я – профессионал» по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайнс”» проводится с поддержкой ОИЯИ, ФИАН, ТРИНИТИ, НИЦ КИ – ИФВЭ, ИК СО РАН и при участии вуза-соорганизатора НГУ.

По итогам регистрации, состоявшейся в период с 27 октября по 7 декабря 2021 года, для участия в направлении «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайнс”» зарегистрировались 2806 студентов из 423 вузов, расположенных в 76 регионах России и за рубежом.

Более половины зарегистрировавшихся студентов – 1761 – студенты бакалавриата. 1045 зарегистрировавшихся участников учатся в магистратуре или специалитете.

Наибольшую заинтересованность при регистрации на направление проявили студенты МФТИ – 223 студента, НИЯУ МИФИ – 156 студентов, МГУ – 95 студентов, МГТУ им. Н.Э. Баумана – 71 студент, НИУ МЭИ – 60 студентов, НИУ ВШЭ – 58 студентов, Университет ИТМО – 56 студентов, МАИ – 52 студента, СПбГУ – 50 студентов, СПбПУ Петра Великого – 48 студентов, УрФУ – 47 студентов, НГУ – 41 студент.

Для подготовки студентов к отборочному этапу олимпиады сотрудниками МФТИ, НИЦ КИ – ИФВЭ и ТРИНИТИ были разработаны демоверсии заданий отборочного этапа по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» для категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет».

Образовательный вебинар для участников направления, на котором были представлены демонстрационные задания и их решения, провел председатель методической комиссии направления, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией фундаментальных взаимодействий ЛФИ МФТИ, ведущий научный сотрудник отдела экспериментальной физики НИЦ КИ – ИФВЭ, сотрудник коллаборации ALICE (CERN) Ю.В. Харлов. Вебинар (видео): <https://youtu.be/w9JJdYhefNk>.

Для проведения отборочного этапа по направлению олимпиады «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» сотрудниками МФТИ, в том числе с привлечением созданной научно-образовательной лаборатории перспективных технологий мегасайенс, НИЦ КИ – ИФВЭ, ТРИНИТИ, ОИЯИ, ФИАН, НГУ и ИК СО РАН были разработаны задания отборочного этапа для категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет». Задания олимпиады, составленные научными сотрудниками, дают возможность студентам познакомиться с актуальными исследовательскими проблемами и попробовать свои силы в решении не учебных, а реальных задач.

Отборочный этап состоялся 10-26 декабря 2021 года. В течение этого периода участники могли выбрать день и время для того, чтобы приступить к решению задач. На решение было отведено 8 часов. Отборочный этап был организован дистанционно с использованием онлайн-платформы Яндекс.Контест.

Участники, показавшие в 2022 году лучшие результаты, получают дипломы призеров, победителей, медалистов. Для каждой категории дипломантов предусмотрены льготы при поступлении в магистратуру и аспирантуру, возможность получить стажировку/работу в научной организации. Мероприятия позволят отобрать студентов, заинтересованных в дальнейшей научной карьере, которые продолжить образование в том числе в МФТИ в области «мегасайенс», начать работу в составе научных коллективов таких организаций как ОИЯИ, ФИАН, ТРИНИТИ, НИЦ КИ, ИК СО РАН, ИЯИ РАН и др., а также в лабораториях МФТИ, НГУ и других университетов. Мероприятия форума развивают общий кругозор студентов в области их будущих возможностей, знакомят с работой российских установок класса «мегасайенс», с коллективами ученых, их профессиональной деятельностью, текущими проектами и разработками.

В рамках олимпиады «Я – профессионал» организуется образовательный форум, который будет включать значительную часть мероприятий (лекций, экскурсий, др.), целью которого является

формирование устойчивого интереса к исследовательской деятельности на уникальных научных установках класса "мегасайенс".

Формируется научная повестка лаборатории перспективных технологий мегасайенс МФТИ. В рамках одного из направлений, проведена поисковая научно-исследовательская работа: выполнен анализ современного состояния исследований, основных направлений в мировой науке и выявление научных конкурентов в области перспектив создания координатных детекторов на основе строу для применения в экспериментах на источниках нейтронов. Для этого учитывался опыт и наработки, которые получены в разное время в работе экспериментов на ускорителях

Опыт применения заимствуется из экспериментов на ускорителях в радиационных полях высокой интенсивности для определения траектории частиц, в которых применяются несколько типов детекторов. Одними из наиболее часто используемых координатных детекторов являются многопроволочные газонаполненные детекторы, такие как пропорциональные и дрейфовые камеры [Ю.В.Заневский, Проволочные детекторы элементарных частиц. Атомиздат, 1978; G.Charpak et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 62 (1968) 262; A.H.Walenta, J.Heintze and B.Schürlein, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 92, (1971) 373].

Многопроволочная пропорциональная камера (МПК) представляет собой систему из большого количества тонких параллельных проволочек, расположенных в одной плоскости и являющихся анодами, которые находятся в газовом объеме между двумя плоскими параллельными друг другу и аноду катодами (сплошными или проволочными). В типичном случае анодные проволочки удалены друг от друга на 2 мм и находятся на расстоянии 4 - 6 мм от катодов. Разность потенциалов между анодом и катодом несколько кВ. Такие параметры МПК обеспечивают газовое усиление 10^{*4} - 10^{*5} и пропорциональность амплитуды сигнала энергии, оставленной частицей в объеме газа [G.Charpak, D.Rahm and H.Steiner, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 80 (1970) 13]. При прохождении заряженной частицы через камеру, образовавшиеся вдоль следа частицы электроны ионизации двигаются в электрическом поле к ближайшим анодным проволочкам, где происходит их лавинное размножение. Электроника регистрирует сигнал с каждой проволочки. Таким образом, приходящие сигналы указывают координаты частицы в МПК с точностью $\sigma=s\sqrt{12}$, где s- расстояние между соседними анодными проволочками. Типичное пространственное разрешение МПК составляет 600 – 700 мкм [Клаус Групен, Детекторы элементарных частиц, Сибирский хронограф, Новосибирск, 1999]. Энергетическое разрешение пропорциональной камеры ~ 30%.

Дрейфовая камера, появившаяся в семидесятые годы прошлого века, является проволочным газонаполненным детектором (как и пропорциональная камера), в котором координата частицы определяется измерением времени дрейфа электронов в газе от места ионизации (пролёта частицы) до сигнальных анодных проволочек. В дрейфовой камере чередуются расположенные в одной плоскости анодные и катодные проволочки, формирующие дрейфовые промежутки (ячейки).

Расстояние между анодными проволочками обычно составляет до нескольких сантиметров. Пространственное разрешение дрейфовой камеры около 200 мкм. Измерение времени не дает возможности определить, с какой стороны от анода прошла частица. Для устранения этой неопределенности обычно используют два слоя дрейфовых ячеек. Эти слои сдвигают относительно друг друга на половину ширины ячейки. Дрейфовые камеры могут быть как плоскими, так и цилиндрическими.

Частным случаем дрейфовой камеры являются детекторы на основе тонкостенных дрейфовых трубок (строу) [W.W.Ash et al., Nucl. Instr. and Meth. A 261 (1987), 399; Г.Д.Кекелидзе, В.Д.Пешехонов, Прецизионные трековые детекторы на основе тонкопленочных дрейфовых трубок (straw), Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2002, Т.33]. Строу обладают рядом преимуществ, таких как минимальное количество их собственного вещества, высокие пространственно-временные параметры и способность работать в сильных радиационных полях, а также гибкость конструктивных решений при создании детекторов и сравнительно низкая стоимость. Все это позволяет успешно применять координатные детекторы (трекеры) на основе строу в больших экспериментальных установках:

- эксперимент 831 (FOCUS) [J.Link, Proceedings of the 1997 ICFA School on High Energy Instrumentation], MECO/Mu2e [Takubo Y. et al. Development and Performance of Resistive Seamless Straw-Tube Gas Chambers // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 551. P. 271-284], Fermilab.

- эксперимент COMPASS, CERN [Abbon P. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 577. P. 455-518; Vyckov V. N. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2006. V. 556. P. 66-79].

- эксперимент ATLAS большого адронного коллайдера (LHC), CERN [Кекелидзе Г.Д. Создание детектора переходного излучения-трекера "В"-типа для установки АТЛАС большого адронного коллайдера : диссертация кандидата технических наук : 01.04.23 / ОИЯИ, Дубна, 2007; Inner Detector Technical Design Report. ATLAS TDR 5, CERN/LHCC/97-17. 1997].

- эксперимент PANDA, FAIR GSI [Wintz P. A Large Tracking Detector in Vacuum Consisting of Self-Supporting Straw Tubes // AIP Conf. Proc. 2004. V. 698. P. 789-792].

Координатные детекторы на основе строу часто используются как детекторы переходного излучения для идентификации заряженных частиц большой энергии по переходному излучению, испускаемому ими при пересечении границ раздела сред с различными диэлектрическими проницаемостями.

Преимущества использования координатных детекторов на основе строу по сравнению с координатными детекторами других видов являются:

- пространственное разрешение ~ 150 мкм;
- минимальная величина радиационной толщины детекторов на основе строу при возможности создания многоканальных детекторов с большим аксептансом;

- высокая радиационная стойкость, объясняемая постоянным обновлением рабочего вещества и широкими возможностями отбора необходимых для создания детекторов материалов;
- высокая локальная нагрузочная способность. Собственное быстродействие может достигать величины $\sim 10^{**7}$ 1/с;
- работа в достаточно широком диапазоне дифференциального давления газового наполнения;
- высокие эксплуатационные свойства с возможностями мониторинга и стабилизации рабочих параметров;
- широкие возможности оптимизации параметров оригинальных детекторов для решения частных экспериментальных задач;
- возможность создания гранулированных строу-детекторов, быстрых двумерных координатных детекторов в результате развития катодного считывания и реализации одновременного определения радиальных и продольных координат методом временного считывания.

Наиболее полный обзор особенностей использования строу в трековых детекторах приведен в работе [Peshekhonov, V.D. Coordinate detectors based on thin-wall drift tubes // Phys.Part.Nucl. 46 (2015) no.1, 94-122].

Конструктивные особенности и основные параметры трековых детекторов на основе строу на примерах выполненных исследований и разработок для экспериментов на ускорительных комплексах приводятся в работах [Howel B., Koltick D., Kobayashi M. Crimping: a Wire Fastening Technique in Wire Chamber Construction // Nucl. Instr. Meth. A. 1990. V. 289. P. 185-193; Bytchkov V. N. et al. Construction and Manufacture of Large Size Straw-Chambers of the COMPASS Spectrometer Tracking System // Part. Nucl., Lett. 2002. No. 2[111]. P. 64-73; Arai Y. et al. (SDC Collab.). A Modular Straw Drift Tube Tracking System for the Solenoidal Detector Collaboration Experiment. Part. Design // Nucl. Instr. Meth. A.1996. V. 381. P. 355-371; Hauviller K. et al. Radiation Hardness of Polysulphone and Polycarbonate Elements for LHC Detectors. JINR Commun. E14-98-245. Dubna, 1998. 11 p.]. Строу состоят из прецизионной пластиковой трубки, изготовленной из тонких пленок (лавсан, полиамид), внутренняя поверхность которой является проводящей и служит катодом, с установленной по ее оси анодной проволокой, концы которой закреплены. Для фиксации анодной проволоки часто используют капиллярные металлические трубки - пины, установленные в пластиковых концевых втулках. Для уменьшения гравитационного и электростатического смещения анода в длинных строу вдоль оси устанавливаются поддерживающие анод втулки (спейсеры) по одной на каждые 80-100 см длины анода. Каптон обладает лучшей радиационной стойкостью и более высокой температурой плавления, в связи с чем этот материал является наиболее часто используемым при изготовлении строу. Для внутреннего слоя стенки трубки обычно используют проводящие пленки с углеродным

наполнением (loaded film) или однородные пленки, покрытые тонким слоем полиимида с 55 % графита (coated film). Также используются однородные пленки с металлизацией алюминием или медью толщиной 1000-1500 ангстрем. Медное покрытие предпочтительнее алюминиевого, так как проводимость медного слоя значительно лучше, чем алюминиевого. Следует отметить, что работа выхода у Cu ~ 4,65 эВ и у Al ~ 4,28 эВ, следовательно, медный катод менее чувствителен к выбиванию электронов под действием ультрафиолета из области развития лавины на анодной проволочке. Для анода в зависимости от длины строу используют обычно золоченую вольфрамовую проволоку диаметром от 20 до 30 мкм с добавкой 3 % рения, что увеличивает диапазон ее упругого удлинения.

Подходы к описанию собственных параметров дрейфовых трубок изложены в работах [Oh S. H., Goshaw A. T., Robertson W. J. Construction and Performance of a 2.7 m Long Straw Drift Tube Prototype Chamber for the SSC // Nucl. Instr. Meth. A. 1991. V. 309. P. 368-376; Ogren H. et al. (represented the SDC Collab.). The Straw Tracker for the SDC Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 367, No. 1-3. P. 133-137; Bychkov V. N. et al. Some Characteristics of the Long Straw Drift Tubes. JINR Commun. E13-98-209. Dubna, 1998. 12 p.; Vasilyev S. E. et al. Signal Transmission Line for Large-Size Segmented Straw Detectors // Instr. Exp. Tech. 2008. V. 51, No. 6. P. 820-825.; Marzec J. et al. Signal Propagation in Straw Tubes with Resistive Cathode // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2000. V. 47, No. 1. P. 18-24; Lu C. et al. Proposal to the SSC Laboratory for Research and Development of a Straw-Tube Tracking Subsystem. SSC-PC-029. 1989. P. 1-49; Boie R. A. et al. Second Coordinate Readout in Drift Chambers by Timing of the Electromagnetic Wave Propagating Along the Anode Wire // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1988. V. NS28. P. 471-477]. Дрейфовую трубку можно рассматривать как волновод с волновым сопротивлением Z_0 . Волновое сопротивление можно оценить как $Z_0 = 60 \ln(R/r)$, что соответствует величине $Z \sim 360$ ом, а скорость прохождения электромагнитной волны по аноду составляет - 0,29 м/нс. Схема получения координатной информации следующая. Заряженная частица создает цепочку кластеров первичной ионизации вдоль своего трека. Измеряется время дрейфа ближайшего к аноду кластера и, тем самым, определяется радиальная координата прохождения заряженной частицы. Соотношение между измеряемыми временами и соответствующими им координатами, так называемые R-T зависимости, калибруются с использованием внешнего трекового детектора. Скорость дрейфа электронов в электрическом поле дрейфовых трубок в наиболее часто используемых газовых смесях Ar/CO₂ около 5см/мкс, или 20нс на 1 мм пути вдоль радиуса. Например, в строу диаметром трубок 10 мм полное время дрейфа составляет 100 нс. Координатное разрешение строу обычно находится в диапазоне от 100 мкм до 500 мкм в районе анодной проволочки. Для устранения лево-правой неопределенности строу камеры обычно содержат два слоя трубок, сдвинутых между собой на величину их радиуса. Стерео координата точки траектории частицы определяется по информации с нескольких различно ориентированных слоев строу камер.

Наличие в трекаре развернутых друг относительно друга камер на угол θ позволяет определять продольную координату Z вдоль анодов с точностью $Z / \sin \theta$. Например в эксперименте PANDA создан 27 - слойный детектор, в котором для части строу слоев был выбран угол наклона 3 градуса. Это позволило получить точность 4 мм для определения продольной координаты вдоль оси строу.

Представленный выше успешный опыт использования строу для создания координатных детекторов в экспериментах на выведенных пучках демонстрирует перспективность развития этой тематики. Коллективом лаборатории уже ранее получены первые результаты, демонстрирующие применимость трекаров на основе строу [CDR SPD <https://arxiv.org/abs/1408.3959>; I.Savin et al. Spin Physics Experiments at NICA-SPD with polarized proton and deuteron beams // EPJ Web of Conferences Volume 85, 2015]. В дальнейшем эти наработки, дополненные уникальными технологиями низкотемпературного напыления В10 на пленки (тонкопленочные покрытия карбида бора В4С), открывает перспективы для проектирования координатных строу-детекторов нейтронов и создания прототипов на базе ОИЯИ.

Приложения.

1. Перечень научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик.
Файл Прилож.1.3.4.pdf

1.3.5 Ресурсное и инфраструктурное обеспечение в 2021г. научно-образовательной лаборатории для реализации выполнения научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории. (Совместно с МФТИ. Договор 400/1984 от 23.11.2021).

В 2021 году готовится инфраструктура научно-образовательной лаборатории. Готовится помещение лаборатории и приобретается оборудование для ее технического оснащения, включая создание экспериментальных стендов (по результатам конкурсных процедур заключены договоры на поставку оборудования №Д21-554 от 13.12.2021, №Д21-553 от 14.12.2021, №Д21-578 от 15.12.2021). Лаборатория позволит проводить обучение перспективным технологиям создания детекторов нейтронов (тонкостеночные дрейфовые трубки, детекторы ультрахолодных нейтронов, микроструктурные газоразрядные детекторы и др.), разработки программного обеспечения моделирования и анализа данных для проектирования и работы на исследовательских станциях нейтронных источников (ROOT, Geant4, GARFIELD, FPGA и др.). В рамках лаборатории также будет разработан экспериментальный практикум, который будет включен в состав разрабатываемого альтернативного курса для студентов третьего года бакалавриата. Осваиваемые обучающимися методы являются современными и универсальными и позволят выпускникам вовлекаться в научную работу исследовательских организаций уже на этапе работы над выпускными квалификационными работами бакалавриата и магистратуры, а также выстраивать траекторию научной карьеры, продолжив работу в выбранных направлениях в аспирантуре. К руководству научно-исследовательскими работами привлечены ведущие ученые ОИЯИ, ведется работа по привлечению ученых и экспертизы ведущих исследовательских центров и коллабораций, которые внесут вклад в разработку перспективных технологий и решений применительно для исследований с использованием источников нейтронов (ESS, ILL, NA62, NA64, DONE, SHIP и др.). Достигнута договоренность о проведении стажировок студентов в исследовательских группах исследовательских реакторов ИБР-2М (Россия), ВВР-К (Казахстан), ILL (Франция).

В результате исполнения обязательств по договору № 400/1984 от 23.11.2021 г. выполнены работы и получены следующие результаты:

1. Создана научно-образовательная лаборатория для проведения научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также элементов и систем экспериментальных станций.

2. Сформирован перечень научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории в 2022 г.

3. Создано ресурсное и инфраструктурное обеспечение в 2021г. научно-образовательной лаборатории для реализации выполнения научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории.

Выполненные работы удовлетворяют условиям договора, технического задания, календарного плана.

Приложения.

1. Акты по расходам на ресурсное и/или информационное обеспечение лаборатории. Файл Прилож.1.3.5.pdf

1.3.6 Реализация образовательной программы для подготовки специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня»:

Модуль 1 «Нейтронные детекторы»

Модуль 2 «Прикладная нейтронная физика»

Модуль 3 «Проектирование интеллектуальных систем»

Модуль 4 «Электроника и автоматика физических установок»

(совместно с Унив. «Дубна». Договор 400/1980 от 22.11.2021).

Для выполнения мероприятий приказом №3477 от 14 октября 2021 г. «О выполнении работ и утверждении состава рабочей группы по гранту в форме субсидий» сформирована и утверждена рабочая группа (ПРИЛОЖЕНИЕ А).

Приказом № 3478к от 14 октября 2021 года (ПРИЛОЖЕНИЕ Б) организован курс повышения квалификации с 14.10.2021 по 01.12.2021 по дополнительной профессиональной программе «Автоматизация эксперимента в области нейтронной физики» в объеме 252 часа (ПРИЛОЖЕНИЕ В), утверждено расписание занятий, и зачислены 35 слушателей на места, финансируемые за счет средств гранта в форме субсидии (шифр 2021-951-ФП5-0011).

Целью реализации программы является – изучение передового опыта, закрепление теоретических знаний, приобретение практических умений и навыков в области нейтронных детекторов, прикладных исследований нейтронной физики, проектирования приборов для проведения и автоматизации экспериментов в области нейтронной физики.

Содержание дополнительной профессиональной программы «Автоматизация эксперимента в области нейтронной физики» и виды учебной деятельности разработаны в соответствии областям знаний и видам деятельности по направлениям реализации Федеральной программы, в частности, в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, области проведения синхротронных и нейтронных исследований. Результатом освоения программы является приобретение новых профессиональных компетенций в соответствии с профессиональным стандартом «Специалист-исследователь в области ядерно-энергетических технологий», утвержден приказом Минтруда России от «16» марта 2018 г. №149н [1.3.6.1]:

- ПК.1 Подготовка исходных данных, наладка экспериментальных стендов и установок для обеспечения выполнения научных исследований,
- ПК.2 Проведение расчетных исследований и измерений физических характеристик на экспериментальных стендах и установках,
- ПК.3 Обработка и анализ результатов расчетных исследований и экспериментальных измерений и составление отчетов по выполненным этапам работ.

Авторский коллектив дополнительной профессиональной программы «Автоматизация эксперимента в области нейтронной физики»:

- Андреев Олег Александрович, старший преподаватель кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», канд. техн. наук, ст. науч. сотр. АО «НИИ «Атолл»;
- Булавин Максим Викторович, начальник сектора нового источника и комплекса замедлителей ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук;
- Горбунов Николай Васильевич, доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Научно-экспериментальный отдел физики на CMS, ЛФВЭ ОИЯИ;
- Давыдов Евгений Александрович, доц. кафедры фундаментальных проблем физики микромира, канд. физ.-мат. наук;
- Кулин Герман Вячеславович, ст. науч. сотр. отделения ядерной физики ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук;
- Пискунова Оксана Ивановна, директор Инженерно-физического института, канд. техн. наук.
- Стрекаловский Олег Викторович, доц. кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», канд. техн. наук, ведущий инженер ЛЯР ОИЯИ.

Объем программы 252 часа, из них аудиторных - 204 часа (128 лекции, 76 часов интерактивные занятия) 32 часа - самостоятельная работа, 16 часов – промежуточная и итоговая аттестация. Программа и входящие в нее виды учебной деятельности реализована Соисполнителем самостоятельно, в том числе с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения. Для осуществления образовательного процесса использовано программно-аппаратные комплексы:

- общего назначения (операционная система (операционные системы), офисные приложения, средства обеспечения информационной безопасности, архиваторы, программы для работы с графическими, видео- и аудиофайлами);
- учебного назначения (интерактивные среды, OrCAD, MATLAB, LabVIEW).

Формирование электронной информационно-образовательной среды осуществлено с помощью программной системы дистанционного обучения Moodle (edu.uni-dubna.ru).

Образовательная программа содержит 4 модуля с возможностью одновременного освоения.

1) Модуль 1 «Нейтронные детекторы»

Объем модуля 54 часа, из них аудиторные - 50 часа, промежуточная аттестация – 4 часа.

Раздел 1.1 Дисциплина «Введение в нейтронную физику и нейтронную оптику»

Объем раздела 36 часов, из них лекции - 34 часа, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Кулин Герман Вячеславович, старший научный сотрудник отделения ядерной физики ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук.

Целью данного курса является формирование у слушателей знаний об оптических свойствах, проявляемых отдельными нейтронами и пучками частиц, а также о методах исследований, приборах и технологиях, в которых применяются эти свойства.

В процессе освоения данного курса слушатели знакомятся с основами физических понятий и процессов, относящихся к нейтронной оптике, изучают устройство и принципы работы измерительных приборов, построенных на данных физических процессах. Также слушатели знакомятся с методами исследований, основанными на применении изученной измерительной аппаратуры, и с существующими научно-исследовательскими программами в области нейтронной оптики.

Содержание раздела:

1. Введение. Открытие нейтрона и зарождение нейтронной физик. Ряд знаковых нейтронно-оптических экспериментов (дифракция нейтронов преломление нейтронной волны, нейтронный интерферометр, нейтронный микроскоп и т.п.)
2. Источники нейтронов. Нейтронный генератор. Ядерные реакторы. Spallation neutron source. Компактные нейтронные источники.
3. Основные свойства нейтрона. Масса. Спин. Заряд. Магнитный момент. ЭДМ.
4. Фундаментальные взаимодействия
Фундаментальные взаимодействия: сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное).
Обзор экспериментов
5. Рассеяние нейтронов на ядре. Длина когерентного рассеяния. Квазипотенциал Ферми, магнитное рассеяние, когерентное и некогерентное рассеяние
6. Дисперсия нейтронных волн Закон дисперсии нейтронных волн в веществе, показатель преломления, эффективный потенциал. Комплексный закон дисперсии, закон дисперсии в случае сильнопоглощающих веществ. Отражение и преломление нейтронных волн. Матричный метод и метод Паррата для расчета отражения и пропускания нейтронной волны от вещества и многослойных структур. Нейтронные интерференционные фильтры
7. Отражение и дифракция нейтронов на макроскопических объектах (зеркала, нейтронводы, суперзеркала, рефлектометрия, дифракция нейтронов, малоугловое рассеяние)
8. Поляризованные нейтроны (магнитный потенциал, прецессия спина в магнитном поле, спин-эхо, Ларморовская прецессия спина, радиочастотный спин-флиппер)
9. Квантовая нейтронная оптика (квантовые эффекты в нейтронной оптике, нестационарных квантовые эффекты)

10. Ультрахолодные нейтроны, источники УХН, эксперименты с УХН

Промежуточная аттестация по разделу 1.1 проведена в установленном расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ Г).

Раздел 1.2. Дисциплина «Основы физики нейтронных и синхротронных исследований»

Объем раздела 18 часов, из них лекции - 16 часа, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Давыдов Евгений Александрович, доцент кафедры фундаментальных проблем физики микромира, канд. физ.-мат. наук.

Целью данного курса является формирование у слушателей знаний о физике фундаментальных взаимодействий, лежащей в основе физических процессов, относящихся к нейтронному и синхротронному излучению.

Слушатели изучают ключевые моменты релятивистской физики, электродинамики, квантовой механики, Стандартной модели физики частиц, необходимые для понимания особенностей процессов излучения, распространения и поглощения нейтронов и синхротронного излучения. Также слушатели знакомятся с существующими и перспективными научно-исследовательскими программами в области нейтронных и синхротронных исследований, получают представление о существующих ограничениях и возможностях соответствующих технологий

Содержание раздела:

1. Обзор нейтронных и синхротронных исследований.

История нейтронных и синхротронных исследований. Действующие экспериментальные установки мирового уровня за рубежом и в России. Примеры фундаментальных исследований и коммерческих технологий на установках нейтронного и синхротронного излучения. Программа развития нейтронных и синхротронных исследований в России.

2. Физика нейтронов. Основные процессы нейтронной физики.

Нейтрон с точки зрения современной физики элементарных частиц. Фундаментальные свойства нейтрона. Самопроизвольный распад нейтрона. Характерные масштабы энергий нейтронной физики.

Взаимодействие нейтронов с веществом. Ядерные реакции с участием нейтронов. Дифракция нейтронов. Нейтронография.

3. Прикладные технологии нейтронной физики.

История развития прикладных технологий нейтронной физики. Перспективные направления развития новых технологий.

4. Физические основы нейтронных исследований на проектах «мегасайенс».

Обзор физических процессов, на основе которых реализуются исследования на установке «ПИК».

5. Физика излучения электромагнитных волн.

Теоретические основы излучения электромагнитных волн. Ускоренное движение заряда. Дипольное излучение. Движение заряда в магнитном поле. Циклотронное излучение. Квантовые ограничения.

6. Основы физики синхротронного излучения

Особенности ультррелятивистского движения заряженных частиц. Эффект Доплера. История открытия синхротронного излучения. Синхротронное излучение и его основные свойства. Характерные масштабы энергий физики синхротронного излучения.

7. Прикладные технологии физики синхротронного излучения.

История развития прикладных технологий физики синхротронного излучения. Перспективные направления развития новых технологий.

8. Физические основы синхротронных исследований на проектах «мегасайенс».

Обзор физических процессов, на основе которых реализуются исследования на установках «ИССИ-4», «СКИФ».

Промежуточная аттестация по разделу 1.2 проведена в установленные расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ Д).

2) Модуль 2. «Прикладная нейтронная физика»

Объем модуля 54 часа, из них аудиторные - 32 часа, самостоятельная работа – 18 часов, промежуточная аттестация – 4 часа.

Раздел 2.1 Дисциплина «Ядерные технологии материаловедения»

Объем раздела 36 часов, из них лекции - 12 часов, практические занятия – 4 часа, самостоятельная работа – 18 часов, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Булавин Максим Викторович, начальник сектора нового источника и комплекса замедлителей ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук.

Целью данного курса является формирование у слушателей понимания целей, задач и методов изучения радиационной стойкости материалов.

Слушатели изучают основы нейтронно-активационного анализа и особенности техники облучения образцов (в том числе крупногабаритных) реакторными нейтронами. Важной составляющей курса является ознакомление слушателей с основами радиационной безопасности и мерами по снижению воздействия ионизирующего излучения на персонал. В частности, слушатели получают знания о методах использования робототехники при работе в опасной зоне.

Содержание раздела:

1. Введение в дисциплину

Актуальность и практическая значимость работ по изучению радиационной стойкости материалов. Направление исследований, текущие цели и задачи изучения радиационной стойкости различных видов материалов

2. Изучение изменения структуры и свойств материалов под действием высоких полей ионизирующего излучения

Материалы и методы, используемые в изучении радиационной стойкости. Облучательная установка, виды экспериментов и типы образцов, нейтронно-активационный анализ, полупроводниковый детектор для восстановления спектра.

Понятие о спектре нейтронов, плотности потока нейтронов и флюенсе. Виды нейтронов по энергиям (быстрые, резонансные, медленные, холодные, ультрахолодные нейтроны). Методы удаления «ненужных» нейтронов из спектра при облучении. Расчет дозы облучения (плотности потока, флюенса нейтронов и т.д.) в зависимости от типа облучаемого материала.

3. Постановка эксперимента по облучению. Восстановление нейтронного спектра

3.1 Техника эксперимента по облучения образцов реакторными нейтронами (на примере облучательной установки и вертикального канала ИБР-2, облучательных каналов реактора типа ВВЭР (ИЯУ, Узбекистан) и т.д.). Подготовка образцов для облучения. Облучение крупногабаритных объектов. Изучение различных характеристик образцов электронных компонент во время облучения, в режиме реального времени

3.2 Экспериментальное определение флюенса нейтронов после облучения при помощи нейтронно-активационного анализа. Градиент флюенса. Использование полупроводникового детектора на основе сверхчистого германия в нейтронно-активационном анализе. Полуэмпирическое восстановление спектра нейтронов.

4. Изучение свойств материалов после облучения. Перемещение и транспортировка радиоактивных образцов. Обращение с твердыми радиоактивными отходами (РАО) после облучения

4.1. Изучение физических, механических, химических и др. свойств материалов после облучения

4.2. Максимально-допустимые дозы облучения для персонала, работающего в радиационно-вредных условиях труда. Меры по снижению воздействия ионизирующего излучения на человека. Понятие периода полураспада. Обращение с РАО после облучения. Жидкие и твердые РАО. Захоронение высокорadioактивных образцов

4.3. Роботизированные манипуляторы для перемещения радиоактивных образцов. Программирование и управление роботом с пневматическим захватом. Транспортировка образцов после облучения

5. Проект «Исследование радиационной стойкости материалов на реакторе ИБР-2»

Промежуточная аттестация по разделу 2.1 проведена в установленные расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ Е).

Раздел 2.2 Дисциплина «Коммерциализация научных исследований и разработок»

Объем раздела 18 часов, из них лекции - 16 часов, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Пискунова Оксана Ивановна, директор Инженерно-физического института, канд. техн. наук.

Целью данного курса является формирование у слушателей целостной системы знаний, описывающих процесс коммерциализации результатов научно-технической деятельности в области нейтронных и синхротронных исследований.

Слушатели изучают виды, способы защиты и методы оценки объектов интеллектуальной собственности, методы генерации новых идей, способы коммерциализации научно-технических разработок.

Содержание раздела:

1. Научно-техническая деятельность и её результаты. Основные понятия и определения. Научно-исследовательская работа (НИР). Основные этапы НИР. Опытно-конструкторская работа (ОКР). Основные этапы ОКР. Научно-технический результат.

2. Объекты интеллектуальной собственности как результат научно-технической деятельности. Классификация объектов интеллектуальной собственности

Определение интеллектуальной собственности. Изобретение. Полезная модель. Промышленный образец. Ноу-хау. Права на интеллектуальную собственность. Патент. Системы классификации патентной информации. Национальные системы классификации. Международные системы классификации.

3. Патентоспособность и патентная чистота

Определения. Критерии патентоспособности. Правовые основания для проверки на патентную чистоту. Этапы проверки на патентную чистоту

4. Творчество: методы генерации и поиска новых идей

Индивидуальные и командные методы. Латеральное мышление. Метод «шести шляп». Теория решения изобретательских задач. Метод морфологического анализа. Метод фокальных объектов. Метод мозгового штурма. Метод Дельфи. Синектика.

5. Учет и оценка стоимости объектов интеллектуальной собственности: необходимость и значение

Особенности получения и использования интеллектуальной собственности (ИС). Характеристики рынка ИС. Оценка интеллектуальной стоимости. Методы оценки ИС

6. Разработка инноваций.

Понятие инновации. Характеристика понятия инновация. Виды инноваций. Возникновение инноваций. Этапы генерации инноваций. Перспективные области внедрения инноваций.

Тема 7. Компании типа Start Up

Определение термина стартап-компания. Характеристика стартапов. Этапы развития стартапов. Системы управления инновационными проектами.

Тема 8. Инновационные технологии

Определение понятия технология. Структура технологии. Классификация технологий. Инновационные технологии. Виды инновационных технологий. Внедрение инновационных технологий. Методы внедрения. Жизненный цикл технологии.

Промежуточная аттестация по разделу 2.1 проведена в установленном расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ Ж).

3) Модуль 3 «Проектирование интеллектуальных систем»

Объем модуля 72 часа, из них аудиторные – 68 часов, промежуточная аттестация – 4 часа.

Раздел 3.1 Дисциплина «Функциональное моделирование сложных систем»

Объем раздела 36 часов, из них лекции - 10 часов, практические занятия – 24 часа, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Горбунов Николай Васильевич, доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», к.т.н., ведущий научный сотрудник Научно-экспериментальный отдел физики на CMS, ЛФВЭ ОИЯИ.

Целью данного курса является формирование у слушателей знаний о функциональном моделировании иерархических проектов.

Слушатели изучают пакет компьютерных программ OrCAD, предназначенный для автоматизации проектирования электроники, и приобретают навыки моделирования и анализа электрических схем.

Содержание раздела:

1. Начало работы в OrCAD 17.2

2. Создание иерархических проектов

Создание принципиальной схемы

3. Создание задания на моделирование и вывод результатов моделирования

4. Анализ электрических цепей постоянного тока
Параметрическое моделирование электрической схемы на постоянном токе
5. Анализ электрических цепей на переменном токе
Моделирование электрической схемы на переменном токе
6. Анализ шума
Моделирование шумов электрической схемы
7. Температурный анализ
Моделирование шумов электрической схемы
8. Анализ электрических цепей методом Монте-Карло
Моделирование шумов электрической схемы
9. Анализ наихудшего случая
10. Анализ электрических цепей с магнитной связью
11. Создание и редактирование стимулов
12. Проблемы сходимости и сообщения об ошибке
13. Анализ линий передачи информации
Моделирование линий передачи
14. Цифровое моделирование
Моделирование цифрового счетчика
15. Смешанное моделирование. Функциональное моделирование
16. Целевые функции
Анализ результатов моделирования с применением целевых функций
17. Редактирование и создание PSpice модели

Промежуточная аттестация по разделу 3.1 проведена в установленном расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ И).

Раздел 3.2 Дисциплина «Введение в обработку экспериментальных данных с использованием нейронных сетей»

Объем раздела 36 часов, из них: лекции - 6 часов, практические занятия – 28 часов, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Андреев Олег Александрович, старший преподаватель кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», канд. техн. наук., старший научный сотрудник АО «НИИ «Атолл».

Целью данного курса является формирование у слушателей знаний об обработке данных научных экспериментов посредством использования нейронных сетей.

Слушатели изучают задачи, методы, алгоритмы, устройство искусственной нейронной сети. Приобретают умения и навыки построения искусственной нейронной сети в среде научных и инженерных расчетов MATLAB.

Содержание раздела:

1. Введение

Краткий исторический обзор развития искусственных нейронных сетей. Искусственная нейронная сеть сейчас: задачи, методы, алгоритмы, устройство. MATLAB как среда научных и инженерных расчетов. Закрепление навыков работы в MATLAB

2. Перцептрон

Модель перцептрона в MATLAB. Обучение и симуляция перцептрона в MATLAB на модельном примере. Многослойный перцептрон. Модель многослойного перцептрона в MATLAB. Обучение и симуляция многослойного перцептрона в MATLAB по экспериментальным данным

3. Сети кластеризации

Самоорганизующиеся карты Кохонена. Модель самоорганизующейся карты Кохонена в MATLAB. LVQ-сети. Модель LVQ-сети в MATLAB. Исследование выборки экспериментальных данных с использованием нейросетевых алгоритмов кластеризации

4. Радиально-базисные сети. Модель радиально-базисной сети в MATLAB. Аппроксимация функции радиально-базисной сетью

5. Сети произвольной архитектуры. Создание нейронных сетей произвольной архитектуры в MATLAB

6. Пред- и постобработка данных при работе с нейронными сетями.

Промежуточная аттестация по разделу 3.2 проведена в установленном расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ К).

4) Модуль 4 «Электроника и автоматика физических установок»

Объем модуля 72 часа, из них аудиторные - 54 часа, самостоятельная работа – 14 часов, промежуточная аттестация – 4 часа.

Раздел 4.1 Дисциплина «Автоматизация физико-технических процессов на экспериментальных нейтронно-физических установках реактора ИБР-2»

Объем раздела 36 часов, из них: лекции 6 часов, практические занятия – 14 часов, самостоятельная работа – 14 часов, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Булавин Максим Викторович, начальник сектора нового источника и комплекса замедлителей ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук.

Целью данного курса является формирование у слушателей практико-ориентированных знаний о методах проведения экспериментальных нейтронных исследований на действующей физической установке – научно-исследовательском реакторе ИБР-2.

Слушатели детально изучают методы замедления нейтронов, использование криогенной аппаратуры, влияние облучения на измерительную установку. Также слушатели получают знания о широком спектре методов определения и контроля параметров протекающих процессов, таких как температура, чистота, расход газа.

Содержание раздела:

1. Медленные нейтроны как инструмент для исследования материалов методом их рассеяния. Стационарные и импульсные реакторы. Метод по времени пролета на импульсных источниках. Спектрометры и системы окружения образца. Замедление нейтронов. Медленные нейтроны. Получение медленных нейтронов. Холодные замедлители нейтронов

2. Шариковый холодный замедлитель нейтронов реактора ИБР-2

Принцип работы шарикового холодного замедлителя нейтронов реактора ИБР-2. Система управления и контроля холодного замедлителя. Принцип работы основных устройств и систем замедлителя. Криогенные гелиевые установки для охлаждения камеры замедлителя

3. Основные элементы системы управления и контроля холодного замедлителя:

- Методы получения мелких твердых фракций (шариков, таблеток) правильной формы при криогенных температурах. Капельница – устройство для изготовления твердых шариков для холодного замедлителя реактора ИБР-2 в жидком азоте,
- Испытательные стенды шарикового холодного замедлителя. Вакуум и методы течеискания. Методы измерения температуры (термодиоды, терморезисторы, термопары). Приборы и методы для определения чистоты рабочего газа замедлителя (газоанализаторы и хроматографы),
- Методы загрузки замороженных шариков в камеру замедлителя при криогенных температурах. Методы определения расхода газа в трубопроводе (трубка Пито, сопло Вентурри, диафрагмы). Методы контроля движения твердых шариков в трубопроводе сложной конфигурации при криогенных температурах (газодинамический и оптический методы). Определение количества шариков в камере замедлителя во время и после загрузки (газодинамический метод, метод камеры-обскуры, использование сцинтиллятора). Программное обеспечение системы управления и контроля

4. Изменение свойств материалов холодных замедлителей нейтронов при облучении:

- Приборы и методы определения количества радиолитического водорода, образующегося в камере замедлителя, под действием облучения (использование газгольдера, хроматография),
- Исследование свойств материалов холодных замедлителей после облучения (изменение структуры, измерение вязкости, плотности). Влияние облучения материалов на деградацию потока холодных нейтронов с поверхности холодного замедлителя.

5. Индивидуальные консультации.

Промежуточная аттестация по разделу 4.1 проведена в установленном расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ Л).

Раздел 4.2 Дисциплина «Автоматизация экспериментальных источников нейтронов и синхротронного излучения»

Объем раздела 36 часов, из них: лекции 28 часов, практические занятия - 6 часов, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Стрекаловский Олег Викторович, доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», к.т.н., ведущий инженер ЛЯР ОИЯИ.

Целью данного курса является формирование у слушателей знаний об автоматизации экспериментальных источников нейтронов и синхротронного излучения.

Слушатели изучают экспериментальные установки для проведения нейтронных и синхротронных исследований, электронику для спектрометрического тракта, архитектуру и элементы системы автоматизации экспериментов. Приобретут навык использования технологий фирмы NI для автоматизации экспериментальных исследований.

Содержание раздела:

1. Экспериментальные установки для исследования с нейтронами.

Системы автоматизации в промышленности и научных исследованиях. Основные элементы автоматизированной системы. Базовые установки ОИЯИ для исследований с нейтронами – реактор ИБР2 и ИРЭН. Реактор ПИК. Подсистемы, входящие в общую структуру управления базовой установкой

2. Экспериментальные установки – источники синхротронного излучения.

СИБИРЬ2, ВЭПП. Программы научных исследований на этих установках

3. Лазер на свободных электронах. Исследования с применением синхротронного излучения

4. Методы детектирования, применяемые при регистрации нейтронов, гамма-квантов и заряженных частиц. Газоразрядные камеры, сцинтилляционные детекторы, полупроводниковые детекторы

5. Применение нейтронных методик для элементного анализа, определения состава вещества, неразрушающих методов контроля вещества, системах радиационной безопасности, определении времени жизни исторических объектов
6. Электроника для спектрометрического тракта
Предусилители, усилители формирователи, АЦП, ВЦП, ЗЦП, анализаторы, дискриминаторы импульсов, счетчики. Защита измерительных каналов от помех. Источники помех. Методы экранирования и заземления. Гальваническая развязка
7. Современные методы цифровой обработки сигналов при регистрации заряженных частиц.
n-гамма разделение сигналов
8. Современный рынок электронных устройств для работы с излучениями.
Фирмы CAEN, ORTEC, Canberra, Phillips как поставщики измерительного оборудования для экспериментальных исследовательских установок. Открытые магистрально-модульные системы NIM, PXI, VME, VXI, CAMAC
9. Архитектура автоматизированной системы управления
Устройства распределенного сбора данных и управления. Проблемы синхронизации и одновременности при сборе и анализе экспериментальной информации. Удаленные хранилища данных. Облачные вычисления
10. Промышленные сети, применяемые в физическом эксперименте
Сети на основе последовательного канала, CAN, ProfiBUS, MODBUS, DCON. Промышленный Ethernet. Беспроводные локальные сети
11. Особенности управления многокомпьютерными системами. Планирование эксперимента. Анализ требований. Симуляция поведения сложной системы с большим числом детекторов. Управление проектом
12. Применение логических контроллеров и регуляторов при проведении экспериментальных исследований. Средства разработки управляющей программы для ПЛК. Язык релейных диаграмм. MMI (интерфейс человек – машина) и SCADA программы. Роль операционной системы. Статические и динамические параметры
13. Программное обеспечение для разработки систем автоматизации. Особенности систем реального времени. Встраиваемые системы автоматизации. Применение ПЛИС
14. Системы «жесткого» реального времени на примере решений реконфигурируемого ввода-вывода фирмы NI. Платформы для создания встраиваемого и компактного оборудования. Системы управления CompactRIO
15. Технологии фирмы NI для автоматизации экспериментальных исследований Применение специализированных пакетов для сбора экспериментальных данных и управления

физическим экспериментом. Среда графического программирования LabView. Контроллеры и управление ими в среде LabView

16. Технологии создания быстрых коммутирующих и защитных систем на базе ПЛИС. Системы управления с обратной связью. Методы регулирования. Реализация ПИД – регулятора и регулятора с нечеткой логикой в среде LV. Математический аппарат, применяемый для анализа систем управления. Цифровая обработка сигналов на системном уровне с использованием LabView

17. Аппаратное резервирование.

Промежуточная аттестация по разделу 4.2 проведена в установленные расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ М).

По итогам обучения слушатели, успешно выполнившие все требования образовательной программы и прошедшие итоговую аттестацию (ведомость итоговой аттестации в ПРИЛОЖЕНИИ Н) отчислены приказом от 01.12.2021 №4061к с последующей выдачей удостоверений о повышении квалификации установленного образца (ПРИЛОЖЕНИЕ П).

Таблица 1.1 - Списочный состав лиц, прошедших обучение по программе дополнительного профессионального образования повышения квалификации «Автоматизация эксперимента в области нейтронной физики» в объеме 252 часа с указанием реквизитов документов, выданных по итогам прохождения обучения

№	Фамилия, имя, отчество	Регистрационный документ	Номер документа
1.	Абраменко Павел Валерьевич	14832	502412187992
2.	Агадуллин Мурат Рафитович	14833	502412187993
3.	Бажин Антон Сергеевич	14834	502412187994
4.	Брагин Данила Романович	14835	502412187995
5.	Вазенмиллер Юлия Павловна	14836	502412187996
6.	Вертихин Александр Алексеевич	14837	502412187997
7.	Ветров Сергей Сергеевич	14838	502412187998
8.	Горбунов Артемий Александрович	14839	502412187999
9.	Дубенскова Алина Александровна	14840	502412188000
10.	Индюкова Мария Дмитриевна	14841	502412188001
11.	Кашникова Татьяна Васильевна	14842	502412188002
12.	Клименко Ольга Павловна	14843	502412188003
13.	Козлов Дмитрий Николаевич	14844	502412188004

14.	Комарова Анастасия Евгеньевна	14845	502412188005
15.	Кузнецов Александр Андреевич	14846	502412188006
16.	Кузнецов Александр Сергеевич	14847	502412188007
17.	Курылёв Владимир Андреевич	14848	502412188008
18.	Кутинова Ольга Васильевна	14849	502412188009
19.	Машинкин Владимир Сергеевич	14850	502412188010
20.	Нездоровин Артур Николаевич	14851	502412188011
21.	Оводов Александр Сергеевич	14852	502412188012
22.	Пименов Егор Андреевич	14853	502412188013
23.	Пименов Михаил Андреевич	14854	502412188014
24.	Попов Александр Алексеевич	14855	502412188015
25.	Рыспаев Искандер Таирович	14856	502412188016
26.	Сатыбалдиева Саглар Кененбаевна	14857	502412188017
27.	Сенькин Валерий Иванович	14858	502412188018
28.	Слаутин Михаил Константинович	14859	502412188019
29.	Стамгазиева Акманар Жумажанкызы	14860	502412188020
30.	Тихомирова Ксения Михайловна	14861	502412188021
31.	Уланова Ирина Ивановна	14862	502412188022
32.	Устинов Дмитрий Валерьевич	14863	502412188023
33.	Фердерер Валерий Эдуардович	14864	502412188024
34.	Хамитова Динара Райхатовна	14865	502412188025
35.	Шпилевская Виктория Станиславовна	14866	502412188026

Приложения.

1. Модули образовательной программы для подготовки специалистов. Файл Прилож.1.3.6_1.pdf
2. Оценочные ведомости. Файл Прилож.1.3.6_2.pdf

1.3.7 Проведение в 2021г. конференции обучающихся и исследователей в возрасте до 39 лет по тематике исследований (совместно с Унив. «Дубна». Договор 400/1980 от 22.11.2021).

Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» проведена 2-3 декабря 2021 года в университете «Дубна». ПРИЛОЖЕНИЕ Р - скриншоты страниц сайта <http://conf.uni-dubna.ru/> с информацией об анонсе Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред», ПРИЛОЖЕНИЕ С - страница сайта <http://conf.uni-dubna.ru/> с информацией об анонсе Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред».

Приказ «Об организации и проведении Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» от 14 октября 2021 г. № 584 - ПРИЛОЖЕНИЕ Т.

Тематика конференции:

- Исследования конденсированных сред с помощью рассеяния нейтронов,
- Разработка и моделирование станций нейтронного рассеяния,
- Детекторы нейтронного излучения,
- Детекторная электроника,
- Методика нейтронного эксперимента.

Организаторы конференции:

- Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований,
- Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Университет «Дубна» (государственный университет «Дубна»),
- Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,
- Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»,
- Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института ядерных исследований Российской Академии наук,
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.

Программный комитет:

- Швецов Валерий Николаевич, канд. физ.-мат. наук, директор Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка – председатель;
- Белушкин Александр Владиславович, д-р физ.-мат. наук, начальник отделения нейтронных исследований и разработок в области конденсированных сред ЛНФ ОИЯИ;
- Боднарчук Виктор Иванович, канд. физ.-мат. наук, начальник Научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ;
- Гафуров Марат Ревгеревич, д-р физ.-мат. наук, заместитель директора по научной деятельности Института Физики ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»;
- Горбунов Николай Васильевич, канд. техн. наук, доц. Государственного университета «Дубна» ведущий науч. сотр. Научно-экспериментального отдела физики на CMS ЛФВЭ ОИЯИ;
- Кравцов Евгений Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, проф., главный науч. сотр. Лаборатории квантовой наноспинтроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук;
- Малахов Александр Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой Государственного университета «Дубна», советник при дирекции ЛФВЭ ОИЯИ;
- Садыков Равиль Асхатович, канд. физ.-мат. наук, ведущий науч. сотр. Лаборатории нейтронных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт ядерных исследований» Российской Академии наук.

Организационный комитет

- Крюков Юрий Алексеевич – председатель Конференции, проректор по научной и инновационной деятельности, доц., канд. техн. наук;
- Пискунова Оксана Ивановна - ученый секретарь Конференции, директор Инженерно-физического института, канд. техн. наук;

- Стифорова Елена Геннадьевна, проректор по образовательной деятельности, доц., канд. юрид. наук;
- Давыдов Евгений Александрович, доц., канд. физ.-мат. наук;
- Клименко Ольга Павловна, старший преподаватель.

Конференция проведена 2-3 декабря в университете «Дубна» (конференц-зал 1-300), подключение участников онлайн осуществлялось посредством системы для видеоконференцсвязи Google Meet.

В работе конференции приняли участие 70 молодых ученых университета «Дубна», ОИЯИ, высших учебных заведений Российской Федерации и ближнего зарубежья. Программа конференции включала 31 доклад по тематике исследований.

Таблица 1.3.7.2 - Программа Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» (ПРИЛОЖЕНИЕ Т)

Время	МЕРОПРИЯТИЯ
2 декабря 2021 года	
9:00-10:00	Регистрация участников конференции
10:00-10:30	Открытие Конференции Приветственная речь ректора государственного университета «Дубна» Д.В. Фурсаева, Директора Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ В.Н. Швецова
	Пленарная Сессия Председатель: Давыдов Евгений Александрович, к.ф.-м.н. доцент кафедры фундаментальных проблем физики микромира
10:30-10:50	<u>Суслопарова А.Е.</u> , Курбаков А.И. Особенности кристаллической и магнитной структуры соединений A_2MnTeO_6 ($A=Li, Na, Ag, Tl$) (онлайн) <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия</i>
10:50-11:10	<u>Матвеева А.Н.</u> ¹ , Зобкало И. А. ¹ , Meven M. ² , Sazonov A. ² , Hutanu V. ² Сложное взаимодействие между магнитными системами 3D и 4F в мультиферроике $DY_1-XHOXMNO_3$ ($X=0, 0.24$) (онлайн) ¹ <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия</i> ² <i>RWTH Aachen University, Garching, Germany</i>
11:10-11:30	<u>Сёмкин М.А.</u> ¹ , Урусова ^{2,3} Н.В., Бескровный ⁴ А.И., Пирогов ^{1,3} А.Н. Магнитные структуры литий/никель/кобальт ортофосфатов (онлайн) ¹ <i>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия</i> ² <i>Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия</i> ³ <i>Институт естественных наук и математики УрФУ, Екатеринбург, Россия</i>

	⁴ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия
11:30-11:50	<u>Девятериков Д.И.</u> ¹ , Кравцов Е.А. ¹ , Жакетов В.Д. ² , Никитенко Ю. В. ² Наблюдение гелимагнетизма в тонких пленках Ду и Но и в сверхрешетке Ду/Но (онлайн) ¹ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия ² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия
11:50-12:10	<u>Даулбаев О.</u> ^{1,2} , Исаенко Л.И. ^{3,4} , Богдзель А.А. ¹ , Лобанов С.И. ^{3,4} , Креницын П.Г. ^{3,4} , Милков В.М. ¹ , Белушкин А.В. ^{1,5,6} Сравнительное исследование монокристаллов LiInSe ₂ для регистрации тепловых нейтронов (онлайн) ¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия ² Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан ³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия ⁴ Институт геологии и минералогии, СО РАН, Новосибирск, Россия ⁵ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия
12:30-12:50	<u>Стрекаловский А.О.</u> ¹ , Каманин Д.В. ¹ , Пятков Ю.В. ^{1, 2} , Горяинова З.И. ¹ , Кузнецова Е.А. ¹ , Солодов А.Н. ¹ , Стрекаловский О.В. ^{1, 3} , Жучко В.Е. ¹ Наблюдение фрагментации осколков деления из реакции ²³⁵ U(n _{th} , f) при пересечении ими твердотельной фольги ¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия ² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия ³ Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия
12:50-13:10	<u>Комендо И.Ю.</u> ^{1,2} , <u>Досовицкий Г.А.</u> ^{1,2} , <u>Коржик М.В.</u> ^{2,3} , <u>Фёдоров А.А.</u> ^{2,3} , <u>Мурашев М.М.</u> ² Неорганические сцинтилляторы для позиционно-чувствительных детекторов нейтронов (онлайн) ¹ НИЦ «Курчатовский институт» - ИРЕА, Москва, Россия ² НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия ³ Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Республика Беларусь
13:10-13:30	<u>Суслов И.А.</u> ^{1,2} , Камнев И.И. ¹ ; Немченко И.Б. ^{1,2} ; Шевчик Е.А. ¹ Новый пластмассовый сцинтиллятор для регистрации нейтронов ¹ Объединенный институт ядерных исследований ² Государственный университет «Дубна»
14:30-14:45	Трансляция Стендовых Докладов
	Пленарная Сессия (продолжение) Председатель: Давыдов Евгений Александрович, к.ф.-м.н. доцент кафедры фундаментальных проблем физики микромира
14:45-15:05	<u>Романцова А.Н.</u> , Семочкина Ю.П., Бадретдинов Т.М., Жирник А.С., Смирнова О.Д. Частота полихроматофильных эритроцитов с микроядрами в периферической крови мышей после пролонгированного гамма-нейтронного облучения (онлайн) НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия
15:05-15:25	<u>Ратушняк М.Г.</u> , Семочкина Ю.П., Жирник А.С., Смирнова О.Д., Посыпанова Г.А. Повреждение ДНК и индукция старения в нейральных стволовых клетках мыши при действии гамма-нейтронного излучения (онлайн) НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

15:25-15:45	<u>Дрожжов К.А.</u> , <u>Голосовский И. В.</u> Порошковый дифрактометр высокой светосилы D3 для реактора ПИК <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия</i>
15:45-16:05	<u>Пшеничная А.Г.</u> Моделирование нейтронного дифрактометра DIPOL для реактора ПИК (онлайн) <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия</i>
16:05-16:25	<u>Усманов О.В.</u> , <u>Зобкало И.А.</u> , <u>Киреенко Ю.М.</u> Трехосный спектрометр холодных нейтронов IN2 (онлайн) <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия</i>
16:25-16:45	<u>Дьячков М.В.</u> , <u>Ульянов В.А.</u> , <u>Сыромятников В.Г.</u> , <u>Калинин С.И.</u> , <u>Колхидашвили М.Р.</u> , <u>Соловей В.А.</u> Тестовый Нейтронный Рефлектометр (ТНР) в зале ГЭК РК ПИК <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия</i>
16:45-17:05	<u>Гапон И.В.</u> ^{1,2} , <u>Кузьменко М.О.</u> ¹ , <u>Тропин Т.В.</u> ¹ , <u>Авдеев М.В.</u> ¹ Рефлектометр GRAINS: состояние и перспективы (онлайн) ¹ <i>Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия</i> ² <i>Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, г. Чернобыль, Украина</i>
17:05-17:15	Заключительное заседание по итогам работы сессий, выступления, дискуссии
Стендовые Доклады	
	<u>Антропов Н.О.</u> ^{1,2} <u>Хайдуков Ю.Н.</u> ^{3,4,5} , <u>Кравцов Е. А.</u> ^{1,2} , <u>Макарова М.В.</u> ^{1, 2} , <u>Проглядо В.В.</u> ¹ <u>Устинов В. В.</u> ¹ Спин флоп переход в искусственных ферромагнетиках ¹ <i>Институт Физики металлов, Екатеринбург, Россия</i> ² <i>Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия</i> ³ <i>Институт исследований твердого тела им. Макса Планка, Штутгарт, Германия</i> ⁴ <i>Исследовательский источник нейтронов Хайнца Майера-Лейбница (MLZ), Гархинг, Германия</i> ⁵ <i>НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, МГУ, Москва, Россия</i>
	<u>Никова Е.С.</u> ^{1,2} , <u>Саламатов Ю.А.</u> ¹ , <u>Кравцов Е.А.</u> ^{1,2} Использование резонансного взаимодействия нейтронов с атомами гадолиния в рефлектометрии поляризованных нейтронов ¹ <i>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия</i> ² <i>Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, Россия</i>
	<u>Саламатов Ю.А.</u> ¹ , <u>Кравцов Е.А.</u> ¹ Возможности метода фазово-амплитудных функций в теоретическом анализе процессов распространения нейтронов в многослойных наногетероструктурах ¹ <i>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия</i>

	<p><u>Якунина Е.М.</u>¹, Кравцов Е.А.^{1,2}, Проглядо В.В.¹, Хайдуков Ю.Н.^{3,4} Структура и магнетизм в многослойных наносистемах Fe/MgO/Cr/MgO/Fe ¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия ²Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия ³Max-Planck Institute for Solid State Research, Штутгарт, Германия ⁴Max Planck Society Outstation at the FRM-II, Гархинг-бай-Мюнхен, Германия</p>
	<p><u>Макарова М.В.</u>^{1,2}, Кравцов Е.А.^{1,2} Исследование поверхности пленки CR/GD/CR МЕТОДАМИ XRR И PNR ¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия ²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия</p>
3 декабря 2021 года	
	<p>Пленарная Сессия (Онлайн Участники) Председатель: Давыдов Евгений Александрович, к.ф.-м.н. доцент кафедры фундаментальных проблем физики микромира</p>
10:00-10:20	<p>Петрова М.О.^{1,2} Концепция детектора тепловых нейтронов типа плоскопараллельная резистивная камера для установок ИБР-2 ¹Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия ²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия</p>
10:20-10:40	<p><u>Подлесный М.М.</u>^{1,2}, Боднарчук В.И.¹, Милков В.М.¹, Балагуров А.М.¹, Бобриков И.А.¹, Богдзель А.А.¹, Даулбаев О.^{1,3}, Дроздов В.А.¹, Петрова М.О.^{1,4}, Швецов В.В.^{1,4} Детектор обратного рассеяния для Фурье дифрактометра высокого разрешения на реакторе ИБР-2 (онлайн) ¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия ²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия ³Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан ⁴Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия</p>
10:40-11:00	<p><u>Курилкин А.К.</u>¹, Колесников А.Г.^{1,2}, Подлесный М.М.¹ Моделирование детектора тепловых нейтронов с борным конвертером в GEANT4 (онлайн) ¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия ²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия</p>
11:00-11:20	<p><u>Швецов В.В.</u>, Богдзель А.А., Дроздов В.А., Мурашкевич С.М., Приходько В.И. Системы сбора данных для экспериментов на реакторе ИБР-2 Объединенный институт ядерных исследований</p>
11:20-11:40	<p><u>Зернин Н.Д.</u> Автоматизация эксперимента на примере новой системы управления прерывателем нейтронов на Фурье-дифрактометре высокого разрешения импульсного реактора "ИБР-2" (онлайн) Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия</p>
11:40-12:00	<p><u>Стамгазиева А.Ж.</u>^{1,2}, Попов Р.Н.¹, Алтынов А.В.¹, Гапон И.В.^{1,3} Разработка системы автоматического контроля вакуума (онлайн) ¹Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия ²Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области "Университет "Дубна", г. Дубна, Россия</p>

	³ <i>Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, с Чернобыль, Украина</i>
12:20-12:40	<u>Бучный Д.А.</u> ^{1,2} , Литвин В.С. ¹ , Трунов Д.Н. ¹ , Марин В.Н. ¹ , Аксенов С.Н. ¹ , Садыков Р.А. ¹ Моделирование и расчет оптимальных параметров блока детекторов «СФЕРА» (онлайн) ¹ <i>Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия</i> ² <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия</i>
12:40-13:00	<u>Баутин В.В.</u> , Горбунов Н. В., Еник Т. Л., Саламатин К. М. Применение ВММЗ в накамерной электронике для нейтронной физики и физики высоких энергий <i>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия</i>
13:00-13:20	<u>Устинов В.В.</u> , Афанасьев С.В., Кутинова О.В., Сухов Е.В. Детектор нейтронов для исследования эта-ядер <i>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия</i>
13:20-13:40	<u>Свечников С.Ю.</u> , Горбунов Н.В., Горбунов И.Н. Обзор источников ионизирующего излучения, используемых для изучения радиационной стойкости материалов <i>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия</i>
13:00-14:00	<u>Голев А.Д.</u> ¹ , Горбунов И.Н. ² Использование машинного обучения для поиска аномалий при контроле качества набора данных на экспериментах в физике высоких энергий ¹ <i>Лаборатория информационных технологий, ОИЯИ, Дубна, Россия</i> ² <i>Лаборатория физики высоких энергий, ОИЯИ, Дубна, Россия</i>
14:00-14:10	Официальное закрытие и подведение итогов работы конференции

Приложения.

1. Документы по организации конференции. Файл Прилож.1.3.7.pdf

1.3.8 Разработка программы дополнительного профессионального образования (повышения квалификации) «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов археологического профиля (совместно с К(П)ФУ. Договор 400/2008 от 03.12.2021).

Содержательная часть совпадает с п. 1.3.1.

Приложение.

1. Учебный план образовательной программы, оценочные материалы, методические материалы.
Файл. Прилож.1.3.8..pdf

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках первого этапа исследований был выполнен ряд научных и научно-методических работ в соответствии с утвержденным планом-графиком. Получены важные результаты по структуре и характеристикам тонкопленочных структур, содержащих слои гадолия (Gd) или кадмия (Cd). Исследованиями подтверждено высокое качество создаваемых структур, которые обладают толщинами напыляемых слоев, соответствующих номинальным, низкими значениями межслойных шероховатостей. Установленное высокое качество полученных тонкопленочных структур позволяет заключить, что рассматриваемые системы могут быть использованы в качестве элементов детекторных технологий в дальнейшем.

Проведена масштабная работа по подготовке инфраструктуры для создания опытно-экспериментального участка по нанесению тонкопленочных бор содержащих покрытий. В рамках этой части исследований выполнена значительная научно-методическая работа:

1. Исследовано влияние режимов вакуумного магнетронного распыления на характеристики пленки карбида бора В4С, осаждаемой на металлические подложки (алюминиевые листы, пластины из нержавеющей стали, алюминиевая и медная фольга). По результатам исследования определены оптимальные толщины слоя карбида бора, которые с одной стороны сохраняют качество покрытия, с другой стороны обеспечивают максимальную степень конверсии нейтронного излучения.

2. Разработана конструкция магнетрона, имеющего высокий коэффициент использования материала мишени – карбида бора В4С. Полученный результат важен с точки зрения экономической эффективности использования данной технологии для массового производства детекторов нейтронов. Мишень для магнетрона, обогащенная изотопом ^{10}B , является довольно дорогим продуктом, в связи с чем условия для его максимально эффективного использования представляются чрезвычайно важными.

3. Проведены тестовые напыления карбида бора В4С на полимерные пленки из лавсана (Mylar) и полиимида (Kapton). Использование полимерных основ для конвертера нейтронов из карбида бора В4С в детекторах нейтронов является нетривиальной технологической задачей, поскольку добиться устойчивого покрытия не удавалось пока никому. Успешные результаты, полученные в этой части исследовательского проекта, являются прорывными и позволят создавать детекторы с уникальными характеристиками.

4. Для дальнейшего развития техники напыления карбида бора В4С на полимерные основы начата реконструкция действующей вакуумной напылительной установки VSR300 под магнетронное нанесение на рулонные материалы. На первом этапе разработана конструкторская документация.

5. Начата реализация планов по созданию и внедрению детекторов тепловых нейтронов с конвертером из карбида бора В4С на станциях нейтронного рассеяния, на различных источниках в России и за рубежом. Разработаны конструкторские документации на производство детектора с конвертером из карбида бора В4С на алюминиевой подложке и позиционно-чувствительным мониторным детектором медленных нейтронов с конвертером из карбида бора В4С.

6. В части развития детекторных технологий для регистрации тепловых нейтронов, основанных на использовании газа ^3He в качестве конвертера, была разработана конструкторская документация для создания позиционно-чувствительного детектора с резистивной нитью. Данная технология уже используется в мировых нейтронных центрах и зарекомендовала себя как надежная и эффективная. В рамках исследовательского проекта ставится задача достичь лучших показателей для пространственного разрешения вдоль анодной нити на уровне 1-1.5 мм.

7. Проведены теоретические и экспериментальные исследования по определению оптимальной конструкции регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером. Рассмотрены твердотельные тонкопленочные детекторы тепловых и холодных нейтронов на основе изотопа ^{10}B и детекторы с высоким временным разрешением с тонкопленочным изотопом ^{10}B для резонансной нейтронной эхо-спектрометрии. Выполненный анализ показывает, что целесообразно для внедрения в на экспериментальные станции по нейтронному рассеянию следующие технические решения: 1) Строу-трубки, работающие на продув, причем малого диаметра, например, 2 mm, с $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на катоде, т.к. относительно легко изготавливаются намоткой на стержень длиной 1 метр и более. 2) Проволочные пропорциональные камеры (MWPC). 3) Перспективными являются микроструктурные детекторы GEM и MicroMegas (MM), они превосходят строу-трубки и MWPC по многим характеристикам, прежде всего – по быстройдействию и временному разрешению.

8. В части развития сцинтилляционных детекторов тепловых и холодных нейтронов разработан прототип одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $\text{ZnS}/^6\text{LiF}$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей. Разработана программа и методики испытаний прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $\text{ZnS}/^6\text{LiF}$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей. Проведены испытания прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $\text{ZnS}/^6\text{LiF}$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей. Успешная реализация всех поставленных в промежуточный отчетный период задач демонстрирует высокий исполнительский уровень участников проекта.

9. В рамках исследовательского проекта создается уникальный сцинтилляционный детектор СФЕРА для нового дифрактометра, создаваемого на импульсном источнике "РАДЭКС" на базе линейного ускорителя ИЯИ РАН. Методом Монте-Карло моделирования определены

оптимальные параметры детектора и его основных узлов. Разработана конструкторская документация для создания детектора и изготовлены некоторые его узлы.

9. Проведена научно-техническая работа по изучению возможности увеличения эффективности регистрации нейтронов нейтронными детекторами на основе сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя. Создано 5 тестовых образцов, которые будут протестированы на пучке нейтронов в течение следующих этапов реализации исследовательского проекта.

Значительное место в отчетном периоде заняли работы в области образования и подготовки кадров. В Московском физико-техническом институте совместно с Объединенным институтом ядерных исследований создана научно-образовательная лаборатория перспективных технологий для установок и экспериментов мегасайенс.

В 2022 году будет произведен набор обучающихся из числа студентов и аспирантов физтех-школы физики и исследований им. Ландау МФТИ для участия в научно-исследовательских практиках и выполнении научно-исследовательских работ. С этой целью за отчетный период сформирован и утвержден перечень научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов.

В процессе выполнения проекта за отчетный период разработано три программы дополнительного профессионального образования, нацеленных на формирование новых компетенций у специалистов естественнонаучного, биомедицинского и археологического профиля. Разработаны учебные планы и календарные учебные графики программ дополнительного профессионального образования, фонд оценочных средств и система оценки знаний, методические текстовые и видеоматериалы.

Реализована образовательная программа для подготовки специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня:

Модуль 1 «Нейтронные детекторы»

Модуль 2 «Прикладная нейтронная физика»

Модуль 3 «Проектирование интеллектуальных систем»

Модуль 4 «Электроника и автоматика физических установок»

По итогам обучения слушатели, успешно выполнившие все требования образовательной программы и прошедшие итоговую аттестацию (ведомость итоговой аттестации в ПРИЛОЖЕНИИ Н) отчислены приказом от 01.12.2021 №4061к с последующей выдачей удостоверений о повышении квалификации установленного образца.

Проведена Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» проведена 2-3 декабря 2021 года в

университете «Дубна». В работе конференции приняли участие 70 молодых ученых университета «Дубна», ОИЯИ, высших учебных заведений Российской Федерации и ближнего зарубежья. Программа конференции включала 31 доклад по тематике исследований.

По итогам выполнения научных и научно-технических задач в рамках реализации проекта можно заключить, что все поставленные цели первого этапа достигнуты. Исследованы и разработаны технические и конструкторские решения по созданию детекторов тепловых и холодных нейтронов различного назначения, обладающих уникальными характеристиками по размерам детектирующей площади, скорости счета, временного и пространственного разрешения. Начато создание материальной базы для реализации найденных технических и конструкторских решений на практике.

С материалами о ходе выполнения исследовательской программы проекта можно ознакомиться на сайте: <http://flnph.jinr.ru/ru/structure/dcmrd/dsc/research-areas-2>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1.1.1.1] Stefanescu, I., et al., Nucl. Instr. Meth. A, 2013, vol. 727, p.109–125, doi:10.1016/j.nima.2013.06.003
- [1.1.1.2] Piscitelli F., et al, JINST.2013.vol.8.p.04020
- [1.1.1.3] Lacy J.L., et al, IEEE Trans. NS 2013.vol.60. N2.p.1140-1146
- [1.1.1.4] Kohli M., et al, Nucl. Instr. Meth. A, 2016, vol. 828, p.242-249
- [1.1.1.5] Anastasopoulos M., et al, JINST, 2017, 12, P04030, doi:10.1088/1748-0221/12/04/P04030
- [1.1.1.6] Piscitelli F., et al, JINST, 2017.vol.12. p03013, doi:10.1088/1748-0221/12/03/P03013
- [1.1.1.7] Kirstein O., et al., POS, 2015, vol. 227, p. 029, doi:10.22323/1.227.0029
- [1.1.1.8] Høglund C., et al., J. Appl Phys, 2012, vol. 111(10), 104908, doi:10.1063/1.4718573
- [1.1.1.9] S. Schmidt, et al., J. Mater. Sci., 2016, 51:10418–10428, doi:10.1007/s10853-016-0262-4
- [1.1.2.1] Д.А. Д.В. Духопельников «Магнетронные распылительные системы. Ч. 1, Устройство, принцип работы, применение», М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [1.1.2.2] С.Д. Гришин, Л.В. Лесков, Н.П. Козлов «Электрические ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1975. – С. 272.
- [1.1.2.3] А.И. Морозов «Физические основы космических электрореактивных двигателей. Элементы динамики потоков в ЭРД» М.: Атомиздат, 1978. – С. 328.
- [1.1.2.4] ELCUT программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tor.ru/elcut/>
- [1.1.6.1] B. Guerard, R. Hall-Wilton, and F. Murtas, “Prospects in mpgds development for neutron detection,” arXiv:1410.0107, 2014.
- [1.1.6.2] C. Höglund, “B4c thin films for neutron detection,” Journal of Applied Physics, vol. 111, no. 10, 2012.
- [1.1.6.3] F. Piscitelli и др. «The Multi-Blade Boron-10-based Neutron Detector for high intensity Neutron Reflectometry at ESS» (Journal of Instrumentation (JINST) Volume 12, P03013, Published 15 March 2017; arXiv:1701.07623v1 [physics.ins-det] 26Jan 2017.

- [1.1.6.4] A. Andronic, C. Garabatos, D. Gonzalez-Diaz, A. Kalweit, and F. Uhlig, “A comprehensive study of rate capability in multi-wire proportional chambers,” *Journal of Instrumentation*, vol. 4, no. 10, p. P10014, 2009).
- [1.1.7.1] G. J. Cuello et al 2016 *J. Phys.: Conf. Ser.* 746 012020
- [1.1.7.2] S. Mühlbauer et al 2016 *NIMA* 832, 297–305
- [1.1.7.3] K. D. Berry et al 2012 *NIMA* 693, 179-185
- [1.1.7.4] K. Kanaki et al 2018 *JINST* 13 P07016
- [1.1.7.5] <https://www.caen.it/products/n1470/>
- [1.1.7.6] <https://www.caen.it/products/n6730/>
- [1.1.8.1] *Position-Sensitive Detection of Thermal Neutrons* / Edited by Convert P. and Forsyth. J.B. Academic Press Inc. London. 1983. 429 P.
- [1.1.8.2] Hall-Wilton R. // CREMLIN Workshop, May 13-16, 2018, St. Petersburg.
https://indico.frm2.tum.de/event/65/sessions/294/attachments/202/333/180513_PNPIInstr_10BDetectors_RJHW-reduced-size.pdf
- [1.1.8.3] Piscitelli F. and Van Esch P. // 2013 *JNST* 8 P04020.
- [1.1.8.4] Кащук А.П., Левицкая О.В.// *ЖТФ* 2020, том 90, вып. 5.
- [1.1.8.5] Van der Ende B.M., Rand E.T., Erlandson A., Li L. // *Nucl. Instr. and Meth. A* 894. 2018. P.138–144.
- [1.1.8.6] Lacy J.L., et al. // *IEEE Trans. NS* v. 60. №2. 2003. P. 1140-1146.
<http://doi.org/10.1109/NSSMIC.2011.6154533>
- [1.1.8.7] Lacy J.L., et al. // *Journal of Neutron Research* 22 (2020) 353–369 353 DOI 10.3233/JNR-190138.
- [1.1.8.8] Piscitelli F., et al. // *JNST* 9 P03007 2014.
- [1.1.8.9] Guerard B., Buffet J. // Patent US Patent App. 13/038,915, no. 20110215251.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/54/45/a7/6c07ac4c63bb62/US20110215251A1.pdf>
- [1.1.8.10] Piscitelli F. *Boron-10 layers, Neutron Reflectometry and Thermal Neutron Gaseous Detectors. Theses PhD.* 2013. 186 P.
https://www.ill.eu/fileadmin/user_upload/ILL/1_About_ILL/List_of_PhD_thesis/Piscitelli_PhDthesis_c.pdf
- [1.1.8.11] Stefanescu I., et al. // *Nucl. Instr. and Meth. A* 727 (2013) 109-125.
- [1.1.8.12] Stefanescu I., et al. // 2013 *JINST* 8 P12003; arXiv:1309.7789v1.
- [1.1.8.13] Кащук А.П., Левицкая О.В., Чураков А.В. // Патент № 174185 (2017).
- [1.1.8.14] Mauri G., et al. // *JNST* 13 P03004 2018.

- [1.1.8.15] Messi F., et al. The Multi-Blade: The 10B-based neutron detector for reflectometry at ESS // <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.058>
- [1.1.8.16] Кашчук А.П., Левицкая О.В., Чураков А.В. // Патент №183457 (2018).
- [1.1.8.17] Oed A. // Nucl. Instr. and Meth. A 263. 1988. P.62–68.
- [1.1.8.18] Buffet J.C., et al. // Nucl. Instr. and Meth. A554. .2005. P. 392-405.
- [1.1.8.19] Sauli F. // Nucl. Instr. and Meth. A386. 1997. P. 531–534.
- [1.1.8.20] Giomataris Y. et al. // Nucl. Instr. and Meth. A376. 1996. P. 29–35.
- [1.1.8.21] Fujiwara T., et al. // 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC); <https://ieeexplore.ieee.org/document/6829580>
- [1.1.8.22] Klein M., Schmidt C. J. // Nucl. Instr. and Meth. A628. 2011. P. 9-18.
- [1.1.8.23] Köhli M., et al. // Nucl. Instr. and Meth. A828. 2016. P. 242-249.
- [1.1.8.24] Uno S., et al. // Physics Procedia 26 (2012) 142 – 152.
- [1.1.8.25] Li Ke, et al. // Chinese Physics C Vol. 40, No. 7 (2016) 076002.
- [1.1.8.26] Muraro A., et al. // Eur. Phys. J. Plus (2021) 136:742.
<https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01707-2>
- [1.1.8.27] Pfeiffer D., et al. // arXiv:1501.05022v1 (2015), 2015 JINST 10 P04004.
- [1.1.8.28] Shoji M., et al. // 2012 JINST 7 C05003; doi:10.1088/1748-0221/7/05/C05003.
- [1.1.8.29] Tsiledakis G., et al. // Universe 2018, 4, 134; doi:10.3390/universe4120134.
- [1.1.8.30] Дубовский И.М., Лебедев В.Т., Серебров А.П.
<https://oiks.pnpi.spb.ru/media/muromets2016/%D0%94%D0%B5%D0%BD%D1%8C%203/%D0%94%D1%83%D0%B1%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf>
- [1.1.8.31] Schmidt C. J. et al. // 2010 J. Phys.: Conf. Ser. 251 012067; doi:10.1088/1742-6596/251/1/012067.
- [1.1.8.32] Geerits N. et al. // Rev. Sci. Instrum. 90, 125101 (2019);
<https://doi.org/10.1063/1.5123987>
- [1.1.8.33] Kashchuk A., et al. // 2020 JINST 15 C09041.
- [1.1.8.34] Kashchuk A., et al. // 2020 JINST 15 C09018._
- [1.1.8.35] Kashchuk A., et al.
[/https://indico.jinr.ru/event/2444/contributions/14611/attachments/11246/18486/Poster NTNPD2021%285%29%20v05.pdf](https://indico.jinr.ru/event/2444/contributions/14611/attachments/11246/18486/Poster%20NTNPD2021%285%29%20v05.pdf)
- [1.3.1.1] Положение о дополнительном образовании в ФГАОУ ВО «К(П)ФУ» / Утв. рект. И. Р. Гафуровым 19.02.2014 г. № 0.1.1.67-06/24/14. – Режим доступа:

https://kpfu.ru/docs/F106434081/pol_do_190214.pdf (дата обращения 10.11.2021).

[1.3.1.2] Федеральный закон Российской Федерации «Об образовании в Российской Федерации» от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ (в действующей редакции от 1.09.2021 г.).

[1.3.1.3] Приказ Министерства образования Российской Федерации «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по дополнительным общеобразовательным программам» (с изменениями на 30 сентября 2020 года).

ТОМ II

Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований

№ 121111900090-5



УТВЕРЖДАЮ

Директор института

См В.Г. Трубников

«25» января 2023 г.

О Т Ч Е Т О ВЫПОЛНЕНИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОГРАММЫ (ПРОЕКТА)

по теме:

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
СТАНЦИЙ НА ИСТОЧНИКАХ НЕЙТРОНОВ ИМПУЛЬСНОГО ИЛИ
ПОСТОЯННОГО ТИПА

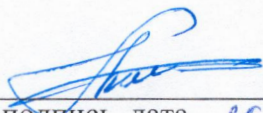
(промежуточный)

Этап 2

Федеральная научно-техническая программа развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 – 2027 годы

Соглашение о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидии от 13 октября 2021 г. № 075-10-2021-115 (внутренний номер СиН.21.0021)



Руководитель проекта,
д-р физ.-мат. наук


подпись, дата 25.01.2023г.

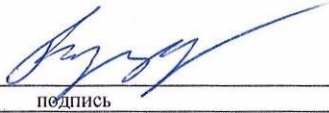

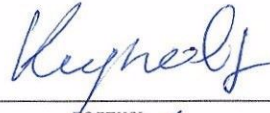
А.В. Белушкин


Дубна 2023


СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

<p>Руководитель исследовательской программы (проекта), д-р физ.-мат. наук</p>	 _____ подпись	<p>А.В. Белушкин</p>
<p>Исполнитель проекта, старший научный сотрудник</p>	 _____ подпись	<p>А.А. Богдзель</p>
<p>Исполнитель проекта, Начальник отдела НЭОКС ИБР-2, к-т физ.-мат. наук</p>	 _____ подпись	<p>В.И. Боднарчук</p>
<p>Исполнитель проекта, заместитель директора по научной работе, к-т физ.-мат. наук</p>	 _____ подпись	<p>Е.В. Лычагин</p>
<p>Исполнитель проекта, старший инженер</p>	 _____ подпись	<p>А.Г. Колесников</p>
<p>Исполнитель проекта, начальник сектора, к-т физ.-мат. наук</p>	 _____ подпись	<p>В.М. Милков</p>
<p>Исполнитель проекта, М.Н.С.</p>	 _____ подпись	<p>В.В. Садилов</p>

Исполнитель проекта, с.н.с.	 <hr/> подпись	А.В. Чураков
Исполнитель проекта, нач. группы, к-т физ.- мат. наук	 <hr/> подпись	Т.Е. Еник
Исполнитель проекта, инженер	 <hr/> Подпись	В.В. Баутин
Исполнитель проекта, Научный сотрудник	 <hr/> подпись	К.М. Саламатин
Исполнитель проекта, В.н.с., д-р физ.-мат. наук	 <hr/> подпись	Б.Ж. Залиханов
Исполнитель проекта, лаборант	 <hr/> подпись	Т.В. Милкова
Исполнитель проекта, ст.инженер	 <hr/> подпись	А.В. Алтынов
Исполнитель проекта, мнс	 <hr/> подпись	М.О. Петрова
Исполнитель проекта, лаборант	 <hr/> подпись	Н.Н. Богомолова
Исполнитель проекта, лаборант	 <hr/> подпись	О.Н. Богомолова

Исполнитель проекта, ведущий инженер	 подпись	А.П. Буздавин
Исполнитель проекта, ст.инженер	 подпись	В.В. Булавина
Исполнитель проекта, ведущий инженер	 подпись	К.В. Булатов
Исполнитель проекта, лаборант физ.лаб.	 подпись	О.В. Володин
Исполнитель проекта, инженер	 подпись	О. Даулбаев
Исполнитель проекта, ведущий инженер	 подпись	В.А. Дроздов
Исполнитель проекта, лаборант	 подпись	О.В. Ермолаева
Исполнитель проекта, ведущий инженер	 подпись	В.В. Журавлев
Исполнитель проекта, инженер	 подпись	Н.Д. Зернин
Исполнитель проекта, К.н., начальник группы	 подпись	А.С. Кирилов
Исполнитель проекта, инженер	 подпись	П.А. Кислицын

Исполнитель проекта, лаборант физ.лаб.	 _____	И.В. Ковалев
Исполнитель проекта, научный сотрудник	 _____	А.К. Курилкин
Исполнитель проекта, снс	 _____	Е.И. Литвиненко
Исполнитель проекта, старший инженер	 _____	Г.Е. Малькова
Исполнитель проекта, ведущий инженер	 _____	И.А. Морковников
Исполнитель проекта, инженер-программист 1 кат.	 _____	С.М. Мурашкевич
Исполнитель проекта, инженер-программист 1 кат.	 _____	Т.Б. Петухова
Исполнитель проекта, мнс	 _____	М.М. Подлесный
Исполнитель проекта, внс	 _____	В.И. Приходько
Исполнитель проекта, инженер	 _____	А.В. Семечкин

Исполнитель проекта, лаборант	 _____ <small>подпись</small>	А.Ч. Сопубекова
Исполнитель проекта, ведущий инженер	 _____ <small>подпись</small>	Г.А. Сухомлинов
Исполнитель проекта, инженер-электроник	 _____ <small>подпись</small>	М.В. Тихонов
Исполнитель проекта, старший инженер	 _____ <small>подпись</small>	Л.А. Трунтова
Исполнитель проекта, старший лаборант	 _____ <small>подпись</small>	Ф.А. Червяков
Исполнитель проекта, СНС	 _____ <small>подпись</small>	А.Н. Черников
Исполнитель проекта, инженер-электроник	 _____ <small>подпись</small>	В.В. Швецов
Исполнитель проекта, инженер	 _____ <small>подпись</small>	Н.В. Швецов
Исполнитель проекта, инженер-электроник 1 кат.	 _____ <small>подпись</small>	В.К. Широков
Исполнитель проекта, начальник группы	 _____ <small>подпись</small>	А.И. Кушлин

Исполнитель проекта, ведущий конструктор	 <hr/> подпись	Ф.М. Котлыков
Исполнитель проекта старший лаборант	 <hr/> подпись	А.А. Евсеев
Исполнитель проекта, МНС	 <hr/> подпись	А.О. Колесников
Исполнитель проекта, начальник сектора	 <hr/> подпись	Н.В. Горбунов
Исполнитель проекта, СНС	 <hr/> подпись	А.В. Красноперов
Исполнитель проекта, начальник группы	 <hr/> подпись	В.В. Терещенко
Исполнитель проекта, инженер	 <hr/> подпись	С.В. Терещенко

СПИСОК СОИСПОЛНИТЕЛЕЙ

№	Название организации	Руководитель работ
1.	Государственный университет «Дубна»	Е.А. Давыдов Доцент, кандидат физико-математических наук
2.	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»	М.Р. Гафуров Директор Института физики, доктор физико-математических наук
3.	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»	А.В. Рогачев Ведущий научный сотрудник, Кандидат физико-математических наук
4.	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»	Е.В. Алтынбаев И.О. Зам. Зав. ОДНИ ИЦ НТ, кандидат физико-математических наук
5.	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской Академии наук	Р.А. Садыков И.О. Зав. Сектора конденсированных сред, ЛНИ, ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук
6.	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н.Михеева Уральского отделения Российской академии наук	Е.А. Кравцов Главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	14
ВВЕДЕНИЕ	15
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	18
2.1.1 Создание прототипов строу-детекторов медленных нейтронов с твердотельным борным покрытием	18
2.1.2 Реконструкция и испытания вакуумной напылительной системы VSR300 под магнетронное нанесение карбида бора В ₄ С на рулонные материалы из полимерных плёнок и металлической фольги. 2 очередь.	20
2.1.3 Изготовление и испытания газового детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора В ₄ С на алюминиевой подложке	23
2.1.4 Изготовление и испытания позиционно-чувствительного мониторного детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора В ₄ С	27
2.1.5 Изготовление и испытания газового позиционно-чувствительного детектора с резистивной нитью для применения на высокопоточных импульсных источниках нейтронов.	31
2.1.6 Разработка конструкции механического прерывателя пучка нейтронов с временной фокусировкой	36
2.1.7 Расчёт конфигурации нейтронотводной системы дифрактометра для импульсного источника нейтронов моделированием методом Монте-Карло с применением программного пакета VITESS Mc Stas	39
2.1.8 Синтез, структурная и магнитная характеристика тонких пленок и планарных наноструктур на основе бора. (Совместно с ИФМ УО РАН).	43
2.1.9 Синтез, структурная и магнитная характеристика планарных наноструктур на основе гадолиния, нейтронные рефлектометрические исследования отражения, прохождения нейтронов и генерации вторичного излучения от таких наноструктур. (Совместно с ИФМ УО РАН).	45
2.1.10 Разработка эскизной конструкторской документации на двумерную позиционно- чувствительную многопроволочную камеру апертурой не менее 200x200 мм ² с пространственным разрешением не менее 2x2 мм ² с поканальной регистрацией сигнала. (Совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ).	54
2.1.11 Разработка конструкторской документации на регистрирующий газоразрядный модуль с твердотельным конвертером с активной площадью не менее 100x100 мм ² , пространственным разрешением не хуже 1.5x1.5x0.05 мм ³ . (Совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ).	54

2.1.12 Разработка конструкторской документации на двумерный позиционно-чувствительный счетчик нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее 100x100 мм ² . (Совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ).	55
2.1.13 Разработка программного обеспечения для определения координаты конверсии нейтрона вдоль одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6 LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей, а также режекции гамма-фона с целью обеспечения существенного улучшения сигнал/шум. (Совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ).	55
2.1.14 Разработка конструкторской документации на двумерную позиционно-чувствительную многопроволочную камеру апертурой не менее 200x200 мм ² с пространственным разрешением не менее 2x2 мм ² с поканальной регистрацией сигнала. (Совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ).	55
2.1.15. Создание прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6 LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее 100x100 мм ² . (Совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ).	56
2.1.16 Разработка конструкции и изготовление контроллера управления детекторной системой для дифрактометра «СФЕРА». (Совместно с ИЯИ РАН).	57
2.1.17 Разработка и изготовление системы юстировки детекторной системы дифрактометра «СФЕРА». (Совместно с ИЯИ РАН).	58
2.1.18 Изготовление комплекта счетчиков для детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА». (Совместно с ИЯИ РАН).	60
2.1.19 Изготовление кольцевого детектора нейтронов для дифрактометра «СФЕРА (часть 2): А) изготовления защиты; Б) изготовление крепления кольцевых детекторов и блоков детектора. (Совместно с ИЯИ РАН).	61
2.1.20 Разработка ускорительной и реакторной технологии. Разработка технологии нанесения покрытий на основе карбида бора В ₄ С на алюминиевые пластины толщиной 0.5 мм для дальнейшего использования в качестве конвертера нейтронного излучения в детекторах на ускорительных и реакторных источниках нейтронов	61

2.1.21 Теоретическое исследование отражения нейтронов в рефлектометрическом режиме и генерации вторичного излучения от многослойных наноструктур, содержащих сильнопоглощающие изотопы гадолиния и бора. (Совместно с ИФМ УО РАН).	67
2.1.22 Нейтронные рефлектометрические исследования многослойных наноструктур на основе MgO. (Совместно с ИФМ УО РАН).	77
2.1.23 Проведение экспериментальных исследований одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей. (Совместно с НИЦ КИ ПИЯФ).	86
2.1.24 Изготовление кольцевого детектора нейтронов для дифрактометра «СФЕРА (часть 2): изготовление и сборка корпуса детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА». (Совместно с ИЯИ РАН).	87
2.1.25 Приобретение комплектующих и оборудования, изготовление стендов, подготовка помещений, необходимых для создания прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее 100x100 мм ² . (Совместно с НИЦ КИ ПИЯФ).	88
2.1.26 Сравнительный анализ изменения характеристик конвертеров из аморфного бора ¹⁰ B и конвертера в виде тонкой плёнки карбида бора ¹⁰ B ₄ C. Исследование сравнительных характеристик при разной толщине плёнки. (Совместно с АО НИИФТА).	89
2.2.1 Реализация 2-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкоплёночных борсодержащих покрытий. Разработка проектной документации	91
2.2.2 Реализация 3-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкоплёночных борсодержащих покрытий в части: А) Приобретение оборудования для подачи технологических газов; Б) Монтаж фильтровентиляционного оборудования чистой зоны и технологических помещений	92
2.2.3 Реализация 3-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкоплёночных борсодержащих покрытий в части: Выполнение строительно-монтажных работ за исключением монтажа фильтровентиляционного оборудования чистой зоны и технологических помещений	92

2.3.1 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для специалистов естественно-научного профиля. (Совместно с К(П)ФУ).	93
2.3.2 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для специалистов биомедицинского профиля. (Совместно с К(П)ФУ).	94
2.3.3 Разработка образовательной программы высшего образования "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для студентов естественно-научного профиля. (Совместно с К(П)ФУ).	94
2.3.4 Разработка образовательной программы высшего образования "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для студентов биомедицинского профиля. (Совместно с К(П)ФУ).	94
2.3.5 Актуализация перечня на 2022-2023 учебный год научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории. (Совместно с МФТИ).	94
2.3.6 Ресурсное и инфраструктурное обеспечение в 2022г. научно-образовательной лаборатории для реализации выполнения научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории. (Совместно с МФТИ).	98
2.3.7 Реализация в 2022 г. научно-исследовательских работ (практик) студентов и аспирантов в рамках работы научно-образовательной лаборатории. (Совместно с МФТИ).	100
2.3.8 Реализация в 2022 г. образовательной программы для подготовки специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня»: Модуль 5 «Физика функциональных материалов и наноматериалов». (Совместно с Унив. «Дубна»).	103

2.3.9 Проведение в 2022 г. конференции обучающихся и исследователей в возрасте до 39 лет по тематике исследований. (Совместно с Унив. «Дубна»).	108
2.3.10 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов археологического профиля. (Совместно с К(П)ФУ).	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВМ	- Вибрационная магнитометрия
ВМР	- Высоковакуумное магнетронное распыление
КД	- конструкторская документация
мкм	- микрометр, 1 мкм = 0,001 мм
ММН	- Многослойные магнитные наноструктуры
ОПЧД	- одномерный позиционно-чувствительный детектор
ПГ	- план-график
ПМ	- программа и методики испытаний
ПНР	- Рефлектометрия поляризованных нейтронов
ПО	- программное обеспечение
РД	- Рентгеновская дифрактометрия
РЗМ	- Редкоземельный металл
РР	- Рентгеновская рефлектометрия
ТЗ	- техническое задание
XPS	- Фотоэлектронная спектроскопия
ILL	- Институт Лауэ-Ланжевена
ESS	- European Spallation Source
Å	- ангстрем, внесистемная единица длины, равная 0.1 нм
λ	- длина волны, измеряется в ангстремах

Отчет содержит:

104 страницы, 87 рисунков, 8 таблиц, 22 литературных источника.

Ключевые слова: сцинтилляционный счетчик, позиционно-чувствительный детектор, одномерный детектор, сцинтиллятор, прототип счетчика, твердотельный конвертор, газоразрядный модуль, магнетронное напыление, многопроволочная камера, Монте-Карло моделирование, нейтронный фильтр, нейтронное рассеяние, поляризованные нейтроны, медленные нейтроны, нейтроновод, прерыватель пучка, дифрактометрия, рефлектометрия, малоугловое рассеяние, высокопоточный источник нейтронов, метод времени-пролета, синхротрон, сверхрешетка, намагниченность, характеристика тонких пленок, фотоумножитель, контроллер-управления, наноструктуры, световод, фазовая проблема, вторичное излучение, гамма-излучение, запаздывающие нейтроны.

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы – проведение синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач, в том числе: поддержка научных и научно-технических проектов, выполняемых организациями, в том числе совместно с организациями, действующими в реальном секторе экономики, представителями международного научного сообщества, а также проектов исследователей в возрасте до 39 лет; поддержка разработки и трансфера прорывных технологий, созданных с использованием результатов синхротронных и нейтронных исследований, а также ускорительных, реакторных и ядерных технологий, в том числе в рамках развития ядерной медицины. Подготовка специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня, в том числе: разработка и реализация образовательных программ высшего образования и дополнительных профессиональных программ, направленных на создание прорывных технологических решений с применением синхротронных и нейтронных источников; организация и проведение научных конференций, школ и семинаров для исследователей и обучающихся по направлениям реализации Федеральной программы в возрасте до 39 лет.

Во время выполнения второго этапа работ в рамках проекта «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа» были достигнуты значимые результаты по всем направлениям проекта. Благодаря проведенным поисковым научным, научно-методическим исследованиям, (как теоретическими, так и экспериментальными), конструкторским и техническим работам появились первые прототипы детекторов из тех, что были запланированы программой исследований в рамках проекта. Благодаря отлаженной технологии нанесения пленок карбида бора на поверхности алюминиевых пластин и полимерных пленок, были созданы и протестированы детекторы тепловых нейтронов различного типа: монитор нейтронного пучка, позиционно-чувствительный детектор с размером чувствительной области. Степень проработанности прототипов таков, что после небольших конструктивных доработок возможно массовое производство подобных детекторов для экспериментальных станций нейтронного рассеяния.

На основе проведенных методических работ на предыдущем этапе выполнения проекта командой НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ разработана техническая документация для производства серии детекторов различного типа: двумерная позиционно-чувствительная многопроволочная камера апертурой не менее 200×200 мм² с пространственным разрешением не менее 2×2 мм² с поканальной регистрацией сигнала; регистрирующий газоразрядный модуль с твердотельным конвертером с активной площадью не менее 100×100 мм², пространственным разрешением не хуже $1.5 \times 1.5 \times 0.05$ мм³; двумерный позиционно-чувствительный счетчик нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее 100×100 мм². Разработан прототип двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6 LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее 100×100 мм². Разработка двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов является безусловным шагом вперед в развитии детекторных технологий для нейтронных центров в РФ.

Значительный прогресс достигнут в сборке сцинтилляционного детектора для дифрактометра «Сфера» и комплекта электроники к нему на импульсном источнике РАДЭКС в ИЯИ РАН.

Выполнены работы по разработке элементов станций нейтронного рассеяния. Выполнено теоретическое обоснование эффективности механического фильтра нейтронного пучка, который позволяет

ограничивать временную область видимости источника и не пропускать поток нейтронов, образовавшийся вне требуемого интервала времени. Подобный фильтр должен быть полезен на источниках периодического действия с топливом из делящихся материалов, поскольку позволит эффективно ограничивать фон, источником которого могут служить запаздывающие нейтроны. Проработана модель механического фильтра и разработана конструкторская документация для его производства.

Выполнена работа по моделированию нейтронной системы для нейтронного дифрактометра для импульсного источника нейтронов. Предложена оптимальная модель с оценкой ее эффективности.

Выполнен ряд работ по изучению тонкопленочных наноструктурированных объектов, содержащих природный гадолиний. Интерес к подобным структурам в рамках проекта обусловлен интересом применения тонкопленочного гадолиния в качестве конвертера нейтронного излучения. Начаты первые экспериментальные работы в этом направлении и получены первые результаты. Подобные исследования будут продолжены в следующем году.

Во время выполнения второго этапа исследований в рамках проекта налажено сотрудничество с предприятием реального сектора экономики с АО НИИТФА, входящей в Госкорпорацию «Росатом». Используя разработанную технологию напыления пленок карбида бора на алюминиевые поверхности совместно со специалистами АО НИИТФА были изготовлены счетчики нейтронов. Было проведено сравнительное исследование чувствительности пропорциональных счетчиков тепловых нейтронов с покрытием катода, выполненным по двум технологиям: нанесения суспензии бора аморфного (используемого в НИИТФА), а также магнетронного нанесения карбида бора. В ходе испытаний установлено, что счетчики карбидом бора нанесенным магнетронным напылением дает прирост чувствительности 12% в сравнении с покрытием суспензии бора аморфного обогащенного. Данные исследования будут продолжены с целью увеличения эффективности регистрации для счетчиков на основе пленок карбида бора, приготовленных магнетронным напылением.

Выполнены масштабные строительно-монтажные работы по созданию опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий. Возведены чистые помещения, обеспечивающие класс чистоты ИСО 7 для проведения работ по созданию тонкопленочных покрытий карбида бора и для выполнения работ по монтажу детекторов и электроники.

Значительная работа проделана в части подготовки молодых специалистов. В университете Дубна реализована дополнительная профессиональная программа «Новые материалы для нейтронных и синхротронных исследований» в объеме 216 часов.

В МФТИ заработала научно-образовательная лаборатория перспективных технологий для установок и экспериментов мегасайенс. В рамках своей деятельности лаборатория принимает участие в мероприятиях Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 – 2027 годы.

В 2022 году в МФТИ состоялся заключительный этап олимпиады по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”». Для участия в заключительном этапе были приглашены студенты категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет», успешно прошедшие отборочный этап в 2021 году. В заключительном этапе участвовал 41 студент из вузов Москвы, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Томска, Новосибирска, Рязани, Ярославля, Волгограда, Краснодар и Ростова-на-Дону. По итогам заключительного этапа были определены дипломанты направления «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» в категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет». Дипломы призеров, победителей и медалистов направления «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» получили 24 студента из МГУ, МИФИ, МФТИ, СПбГУ, СПбПУ, ИТМО, НГУ и РГУ им. С. А. Есенина. Для каждой категории дипломантов предусмотрены льготы при поступлении в магистратуру и аспирантуру, возможность получить стажировку/работу в научной организации.

В К(П)ФУ реализованы дополнительные профессиональные программы повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов естественно-научного, биомедицинского и археологического профилей. Проведены учебные занятия, проведена аттестация и выданы удостоверения о повышении квалификации установленного образца. Разработаны образовательные программы высшего образования уровня магистратуры по дисциплине «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для студентов естественно-научного и биомедицинского профилей. Разработаны и утверждены в установленном порядке: программа дисциплины, учебный план и календарный учебный график, фонд оценочных средств и система оценки знаний.

В общей сложности в рамках разработанных учебных модулей за время реализации второго этапа проекта прошло обучение 73 человека.

Вторая Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» с международным участием проведена 21-23 ноября 2022 года в университете «Дубна». В работе конференции приняли участие 86 молодых ученых университета «Дубна», ОИЯИ, высших учебных заведений Российской Федерации и ближнего зарубежья. Программа конференции включала 40 докладов по тематике исследований, из них 22 участника в возрасте до 39 лет.

2.1 Мероприятия по проведению синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач

2.1.1 Создание прототипов строу-детекторов медленных нейтронов с твердотельным борным покрытием

В ЛНФ, Научно-экспериментальный отдел комплекса спектрометров (НЭОКС) ИБР-2 рамках исследовательской программы (проекта) по теме: “Разработка и создание современных экспериментальных станций источников импульсного или постоянного типа” изготовлен и испытан газовой детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B_4C на полимерной пленки, согласно пункта 2.1.1 «Создание прототипов строу-детекторов медленных нейтронов с твердотельным борным покрытием» плана графика.

Был разработан, изготовлен и протестирован прототип строу детектора с напылением B_4C для регистрации тепловых нейтронов. Для изготовления строу-детекторов медленных нейтронов B_4C наносилось на полимерную пленку методом вакуумного осаждения. Строу-трубка сварена с помощью ультразвука и имеет диаметр 10 мм. Сварка осуществляется из полоски пленки, которую закрепляют на специально подготовленном стержне с отверстиями необходимыми для удержания пленки с помощью вакуума и формирования нахлеста для сварки. Процесс сварки происходит за счет акустических колебаний головки – сонотрода. Колебания головки воздействуют на свариваемые пленки, собранные внахлест, с перекрытием порядка 1 мм., что делает трубку практически однослойной.

После сваривания трубки, вакуум отключается и в стержень, на котором происходила сварка, подается избыточное давление. За счет попадания воздуха между стержнем и трубкой, изготовленная трубка легко снимается. Фото такой трубки представлено на рисунке 2.1.1.1. Трубка изготовлена из металлизированного лавсана (20мкм) с нанесенным на алюминиевую подложку слой B_4C с толщиной 100 нм. Толщина напыления $PET/AL/B_4C$ была исследована методом эллипсометрии.



Рисунок 2.1.1.1. Сварной шов трубки из лавсана с покрытием B_4C на внутренней стороне цилиндра.

Для прототипа строу детектора был изготовлен корпус, который обеспечил закрепление трубки и анодной 30 мкм. проволоки. Корпус обеспечивает газовый проток рабочей смеси, а также подвод высокого напряжения и считывание сигналов. (Рисунок 2.1.1.2)

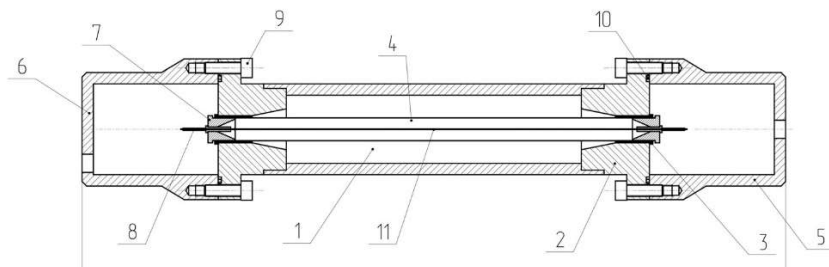


Рисунок 2.1.1.2. Слева - корпус строу детектора; справа – чертеж корпуса строу детектора.



Рисунок 2.1.1.3. Установка прототипа детектора для тестов с источником нейтронов.

Измерения проводились с источником нейтронов ^{252}Cf , в качестве рабочего газа была использована смесь $\text{Ar}/\text{CO}_2(70/30\%)$ в проточном режиме. Детектор в составе экспериментальной установки представлен на рисунке 2.1.1.3.

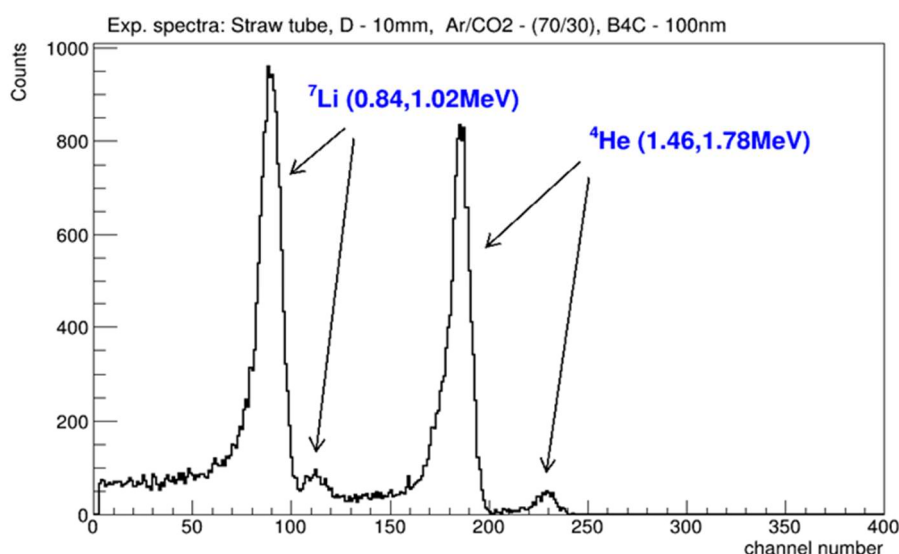


Рисунок 2.1.1.4. Амплитудный спектр строу-трубки.

На рисунке 2.1.1.4 представлен амплитудный спектр продуктов реакции конверсии, полученный при рабочем напряжении 1103В. В амплитудном спектре, полученном со строу-трубки, четко выделяются пики, соответствующие полной потере кинетической энергии продуктов реакции конверсии в газовом объеме. Подложки слева от пиков обусловлены стеночным эффектом. Эффективность регистрации тепловых нейтронов, полученных с помощью источника ^{252}Cf + полиэтиленовый замедлитель, для строу-трубки с конвертером B_4C толщиной 100нм составляет 0.67%.

На рисунке 2.1.1.5 представлены амплитудный спектр, измеренный с источником ^{252}Cf и спектр, полученный в моделировании при использовании пакета GEANT4. Шкала X экспериментального спектра Рисунка 2.1.1.4 была преобразована в единицы энергии, используя значения, полученные из линейной аппроксимации 4 пиков с известной энергией. Форма спектров и положения пиков хорошо согласуются между собой. Различия спектров можно объяснить тем, что пакет GEANT4 не учитывает при моделировании процессы дрейфа зарядов и газовое усиление.

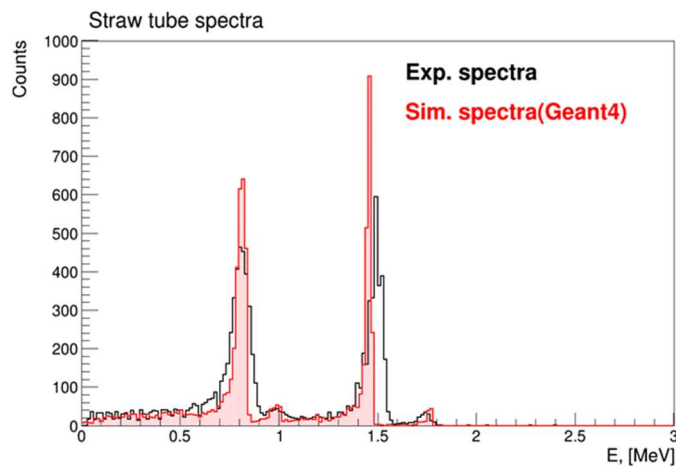


Рисунок 2.1.1.5. Амплитудный спектр вторичных частиц: черный спектр — экспериментальный спектр, красный — результат моделирования без учета процесса ионизации.

Результаты исследований подтверждают применимость строу-трубок для регистрации тепловых нейтронов. Установленный порог в 30 кэВ обеспечивает хорошую дискриминацию гамма-квантов и надежную регистрацию тепловых нейтронов

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Конструкторская документация прототипов строу-детекторов медленных нейтронов с твердотельным борным покрытием. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.1_Конструкторская документация прототипов строу-детекторов медленных нейтронов с твердотельным борным покрытием.pdf](#)
- Акт изготовления прототипа газового строу-детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора от 13.06.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.1_Акт изготовления прототипа газового строу-детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора от 13.06.22г.pdf](#)
- Акт испытаний газового строу-детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора №1 от 14.10.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.1_Акт испытаний газового строу-детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора №1 от 14.10.22г.pdf](#)

2.1.2 Реконструкция и испытания вакуумной напылительной системы VSR300 под магнетронное нанесение карбида бора B_4C на рулонные материалы из полимерных плёнок и металлической фольги. 2 очередь

Проведен 2-й этап реконструкции вакуумной установки VSR300 под нанесение карбида бора B_4C на рулонные материалы. В соответствии с разработанной конструкторской документацией установка обеспечивает кинематику перематывания пленки под магнетронное нанесение карбида бора B_4C на рулонные материалы из полимерных плёнок и металлической фольги. Установка включает в себя:

- Устройство перемотки;
- Магнетронный распылитель;
- Ионный источник;
- Монтажные фланцы с вводами или отдельные вводы;
- Инвертор питания магнетрона;
- Инвертор питания ионного источника

Установка полностью соответствует требованиям Технического задания. Все работы выполнены на производственной базе компании ООО «Ферри Ватт», г. Казань

Перенесение оригинальной собственной методики вакуумного нанесения карбида бора B_4C на полимерные плёнки на рулонные материалы даст возможность создания уникальных детекторов нейтронов как по площади, так и по пространственному и временному разрешению. В том числе появится возможность изготавливать в ОИЯИ новый класс straw-детекторов диаметром 5 мм или 10 мм и длиной до 3000 мм.

ОПИСАНИЕ. Основные элементы вакуумной установки VSR300 под нанесение карбида бора B_4C на рулонные материалы (рис. 2.1.2.1).

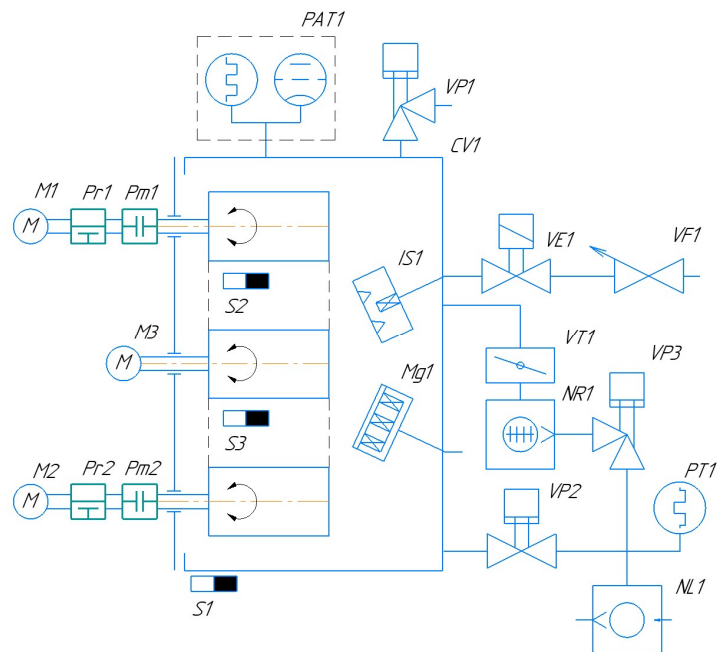


Рисунок 2.1.2.1. Вакуумная схема

Спецификация вакуумной схемы представлена на рис. 2.1.2.2.

Обозн	Наименование	Кол.	Примечание
CV1	Камера вакуумная	1	
NL1	Насос форвакуумный	1	
NR1	Насос турбомолекулярный ISO250F	1	
VT1	Затвор вакуумный	1	Ду250
VP1	Клапан вакуумный	1	
VP2	Клапан вакуумный	1	
VP3	Клапан вакуумный	1	Ду40
VE1	Клапан электромагнитный	1	
PT1	Датчик давления тепловой	1	
PAT1	Датчик давления широкодиапазонный	1	
VF1	Регулятор расхода газа	1	
IS1	Источник ионов	1	
Mg1	Магнетрон	1	
S1	Концевой выключатель	1	
Pr1, Pr2	Система удержания	2	Пневмораспред 3/2
M1, M2, M3	Привод подложкодержателя Delta	3	Пневмораспред 3/2
Pm1, Pm2	Пневмомуфта PNF95	2	
S1	Концевой выключатель	1	
S2, S3	Датчик провиса пленки	2	

Рисунок 2.1.2.2. Спецификация к вакуумной схеме

Вакуумный пост (общий вид Вакуумного поста представлен на рис. 2.1.2.3) состоит из вакуумной камеры 1, установленной на сварной раме 4, с высоковакуумной откачной системой на базе турбомолекулярного насоса и высоковакуумного затвора. Система перемотки рулонных материалов 5 устанавливается на откатной двери камеры и имеет возможность перемещения по направляющим 7. Подвод всех коммуникаций к системе перемещения производится по гибкому кабель-каналу 6.

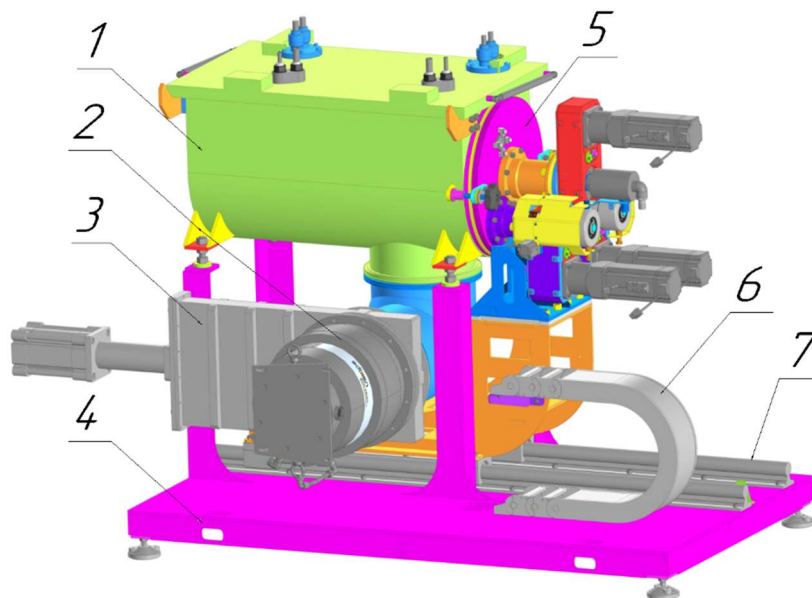


Рисунок 2.1.2.3. Общий вид вакуумного поста. Обозначения на рисунке: 1 - вакуумная камера, 2 - турбомолекулярный насос, 3 - высоковакуумный насос, 4 - рама, 5 - система перемотки, 6 - гибкий кабель-канал, 7 – направляющие. (Форвакуумный насос на рисунке не представлен)

Система перемотки (рис. 2.1.2.4) основана на базе трех сервоприводов ЕСМА-СА0807SS (поз. 7) с Блоком управления ASD-A2-0721-M (0,75 kW, 220 V) (обозначение на вакуумной схеме М1-М3).

Приводы М1 и М2 подключаются к вакуумным вводам через планетарный редуктор и пневматическую муфту 5 (Pm1 и Pm2), а также имеют систему удержания. Система удержания 4 представляет собой фрикционный механизм на базе пневматического цилиндра, управляемого пневмораспределителей 3/2 (24 VDC, 1 катушка, 1 герметичный концевой выключатель). Пневматическая муфта 5 служит для соединения-разъединения сервоприводов с соответствующими вакуумными вводами.

Привод М3 подключается непосредственно к водоохлаждаемому барабану через вакуумный ввод. Подвод воды осуществляется через ротационный ввод воды 6. Привод М3 является основным и определяет скорость перемещения напыляемой пленки. Скорости вращения приводов М1 и М2 должны автоматически подстраиваться под скорость вращения М3, являются переменными и зависят от количества намотанной на барабаны пленки. Система перемотки дополнительно имеет 2 датчика провиса ленты («сухой контакт»).

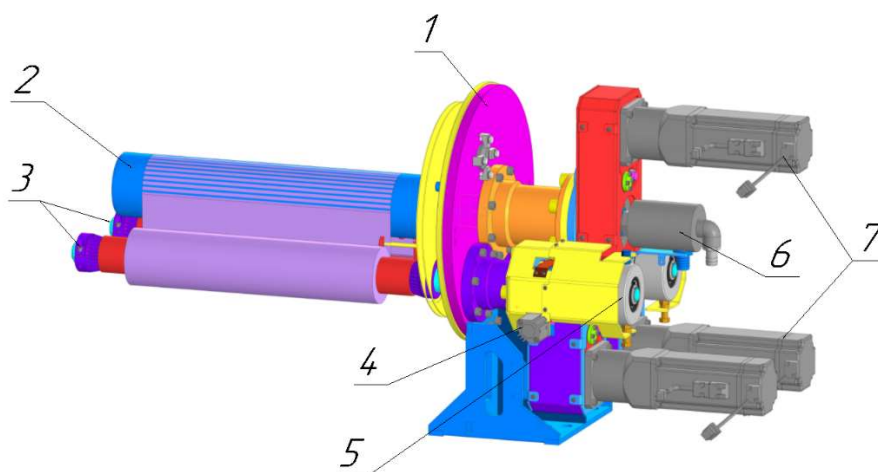


Рисунок 2.1.2.4. Система перемотки. Обозначения на рисунке: 1 - откатная дверь вакуумной камеры, 2 - водоохлаждаемый барабан, 3 - перематывающие барабаны, 4 - система удержания, 5 - пневмомуфта, 6 - ротационный ввод воды, 7 - сервопривода.

Вакуумная камера (поз. 1, рис. 2.1.2.5) имеет порты для установки технологических источников: магнетрона 2 и ионного источника 3. Поток с технологических источников фокусируется на

водоохлаждаемый барабан 4, что позволяет проводить процесс напыления с ассистированием. Для защиты от запыления рулонного материала на перематывающих барабанах 5 и 6 низкоэнергетичными атомами материала, в вакуумной камере устанавливаются защитные экраны 7.

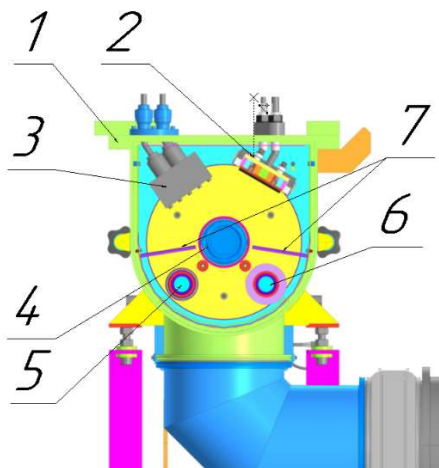


Рисунок 2.1.2.5. Вакуумная камера в разрезе. Обозначения на рисунке: 1 - вакуумная камера, 2 - магнетрон, 3 - ионный источник, 4 - водоохлаждаемый барабан, 5 и 6 - перематывающие барабаны, 7 - защитные экраны.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт выполнения работ по реконструкции №33 от 26.10.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.2_Акт выполнения работ по реконструкции №33 от 26.10.22г.pdf](#)
- Акт выполнения работ по реконструкции №37 от 24.11.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.2_Акт выполнения работ по реконструкции №37 от 24.11.22г.pdf](#)
- Акт испытаний (к договору №01-10/22 от 12.10.22г.) от 21.11.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.2_Акт испытаний \(к договору №01-10/22 от 12.10.22г.\) от 21.11.22г.pdf](#)

2.1.3 Изготовление и испытания газового детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B_4C на алюминиевой подложке

Изготовлен и испытан газовой детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B_4C на алюминиевой подложке.

Детектор предназначен для проведения исследований на канале №4 реактора ИБР-2 - установка ЮМО (Станция малоуглового рассеяния нейтронов) и будет использоваться в качестве монитора тепловых нейтронов в пропорциональном режиме при минимальном газовом усилении для исключения создания большого объёмного заряда. Детектор представляет собой цилиндрическую пропорциональную многопроволочную камеру низкого давления. Корпус (кожух) изготовлен из алюминиевого сплава АМг6, его внешний диаметр составляет 300 мм (вместе с газовым разъемом 338 мм), внутренний 264 мм, высота 100 мм (вместе с трубкой подвода атмосферного давления 156 мм), толщина входного окна 6 мм, максимальная площадь детектирующей области составляет 366 см².

В объеме детектора расположен твердотельный конвертер из карбида бора B_4C на алюминиевой подложке, выполняющий роль катода, и одна анодная плоскость, расположенная на расстоянии 10 мм от катода. Анодная плоскость представляет собой текстолитовую рамку в форме кольца с внешним диаметром 260 мм, внутренним диаметром 216 мм и высотой 6 мм с натянутыми тонкими позолоченными проволоками диаметром 50 мкм и шагом 5 мм. На рисунке 2.1.3.1 представлены фотографии детектора.

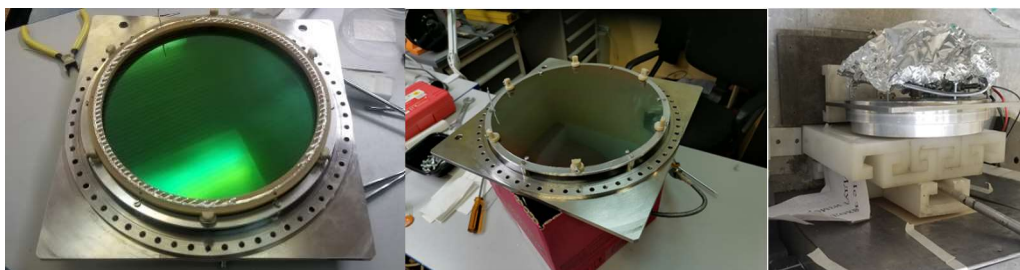


Рисунок 2.1.3.1. Детектор тепловых нейтронов на основе В₄С.

С помощью детектора проведены исследования по изучению влияния толщины напыления ¹⁰В₄С конвертера тепловых нейтронов, состава газовой смеси и рабочего давления на его рабочие характеристики. Измерения проводились при использовании источника нейтронов ²⁵²Cf и замедлителя из полиэтилена. Амплитудные спектры продуктов реакции n + ¹⁰B были получены при использовании зарядочувствительного предусилителя, спектрометрического тракта и многоканального амплитудного анализатора (МСА8000). При измерениях исследовались основные характеристики детектора, к которым можно отнести эффективность регистрации нейтронов, энергетическое разрешение и чувствительность к гамма-излучению.

Влияние толщины напыления В₄С на характеристики детектора выполнялось посредством замены пластин с конвертером. В измерениях использовались пластины, изготовленные в ESS (European Spallation Source) - (термополированные стекла с толщиной слоя В₄С - 500, 1000 и 2000 нм) и в Государственном университете Дубна (алюминиевые пластины толщиной 0.5 мм с толщиной слоя В₄С - 300, 440 и 1000 нм).

Измерения проводились с рабочей смесью Ag/CO₂(90%/10%) при давлении 1 бар. Стекла и алюминиевые пластины накрывались сверху лавсаном, толщина которого соответствует полному поглощению продуктов реакции конвертации, с отверстием посередине диаметром 6 см для обеспечения постоянства активной площади конвертера и исключения краевых эффектов (Рисунок 2.1.3.2. а) и б)). Положение детектора относительно источника ²⁵²Cf было одинаковым для всех измерений.

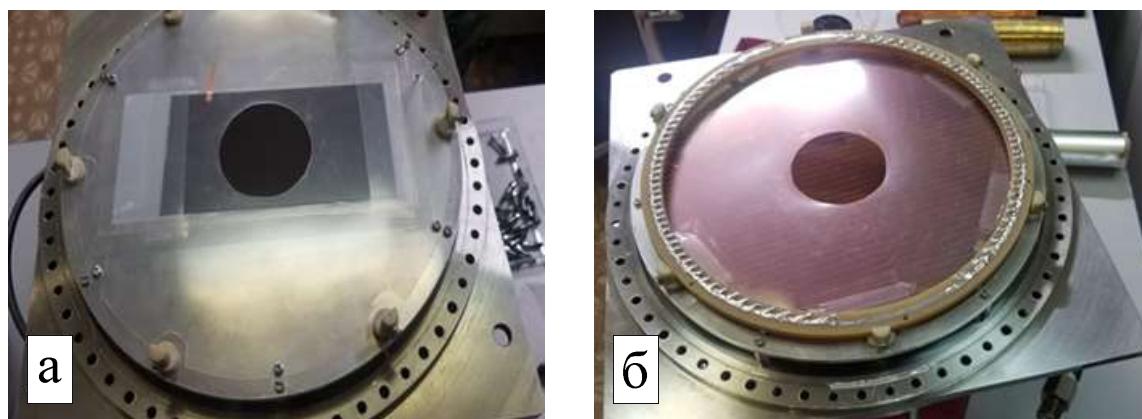


Рисунок 2.1.3.2. Сборка детектора а) - с термополированным стеклом с толщиной слоя В₄С – 1 мкм ESS ERIC; б) - с алюминиевой пластиной с толщиной слоя В₄С – 1 мкм Университет Дубна.

На рисунке 2.1.3.3. а) представлены амплитудные спектры, полученные при измерениях с конвертерами, произведенными в ESS, с толщиной слоя В₄С – 500, 1000 и 2000 нм. Измерения проводились при напряжении 1550V. Форма экспериментальных спектров хорошо согласуется с результатами моделирования в GEANT4, представленными на рисунке 2.1.3.3. б). В моделировании использовалась плотность конвертера В₄С соответствующая напыленному слою на стеклах ESS.

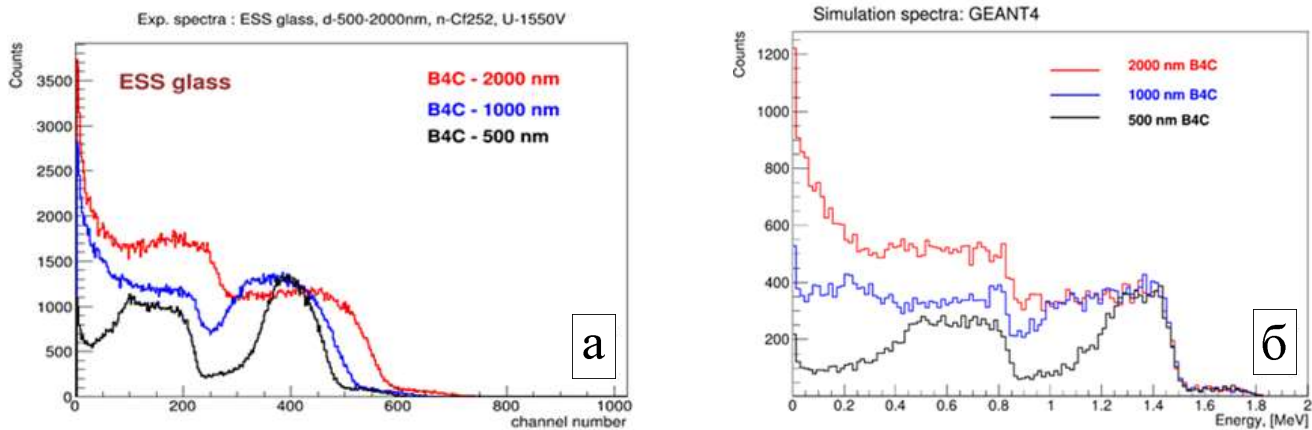


Рисунок 2.1.3.3. Амплитудные спектры а) полученные при измерении конвертера, произведенного в ESS, с толщиной слоя В₄С – 500, 1000 и 2000 нм и б) расчётные спектры, полученные в пакете GEANT4.

Также было проведено сравнение амплитудных спектров, измеренных с образцами конвертеров ESS и Университета Дубна, с толщиной слоя В₄С 1000 нм (Рисунок 2.1.3.4.). Условия измерений были идентичны в обоих случаях. Форма спектров совпадает, однако, эффективность регистрации нейтронов при использовании конвертера, изготовленного в Университете Дубна меньше примерно на 25%, чем для образцов ESS. Различие, по-видимому, связано с разной плотностью нанесенного слоя. Эффективность регистрации тепловых нейтронов, полученных с помощью источника ²⁵²Cf+ полиэтиленовый замедлитель, для детектора с образцом конвертера Университета Дубна толщиной 1000нм составляет 3%.

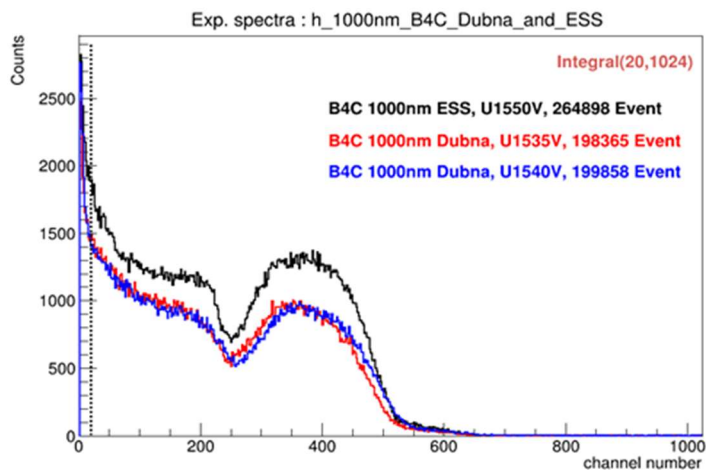


Рисунок 2.1.3.4. Сравнение спектров полученных при измерении стекол (ESS) и алюминиевых пластин (Дубна) с толщиной слоя ¹⁰B₄С 1000 нм.

Исследование влияния состава газовой смеси на рабочие характеристики было проведено с использованием Ar/CF₄ (94%/6%), Ar/CO₂(90%/10%) и Ar/CO₂(97%/3%) при давлении 1000 мбар. Полученные в результате измерений спектры (Рисунки 2.1.3.5. а) и б)) показали, что для смесей Ar/CO₂ наблюдается меньшая чувствительность к гамма-фону и лучшая энергетическая разрешающая способность.

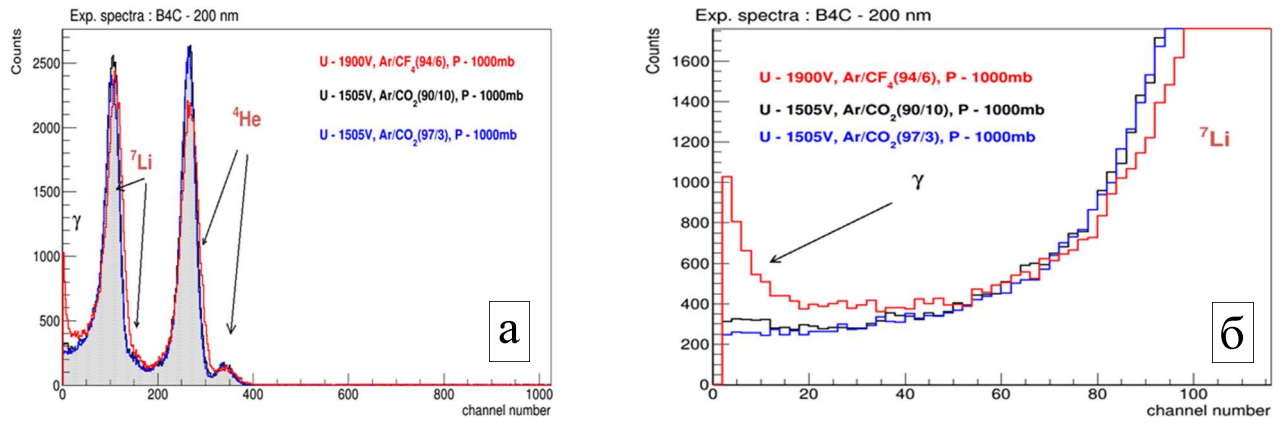


Рисунок 2.1.3.5. Влияние различных составов газовых смесей Ar/CF₄(94%/6%), Ar/CO₂(90%/10%) и Ar/CO₂(97%/3%). а) - амплитудные спектры (общий вид) и б) начальный участок амплитудных спектров (видно различие в регистрации гамма).

Исследование влияния рабочего давления на рабочие характеристики детектора проводилось с толщиной напыления ${}^{10}\text{B}_4\text{C}$ - 200 нм. В качестве рабочего газа была выбрана смесь Ar/CF₄ (94%/6%). Перед каждым измерением детектор подключался к вакуумному пульту, и часть рабочей смеси откачивалась. Измерения амплитудных спектров были выполнены при давлениях 1000, 750, 500, 200, 100 и 50 мбар. Время каждого набора данных составляло 2 часа (Рисунок 2.1.3.6. а) и б)). Рабочее напряжение для каждого измерения подбиралось таким образом, чтобы порог дискриминации гамма квантов был примерно одинаковым.

Форма спектров для давлений 1000, 750 и 500 мбар практически идентична. При дальнейшем уменьшении давления треки вторичных частиц не укладываются в толщину газового объема и теряют только часть своей энергии. Это приводит к существенному изменению формы спектра. При давлении 100 и 50 мбар спектры вторичных частиц формируют одиночный пик. Несмотря на изменение формы спектра, количество зарегистрированных нейтронов, при отсечении гамма-фона, практически не изменяется. Это свидетельствует о том, что детектор может работать при низких давлениях.

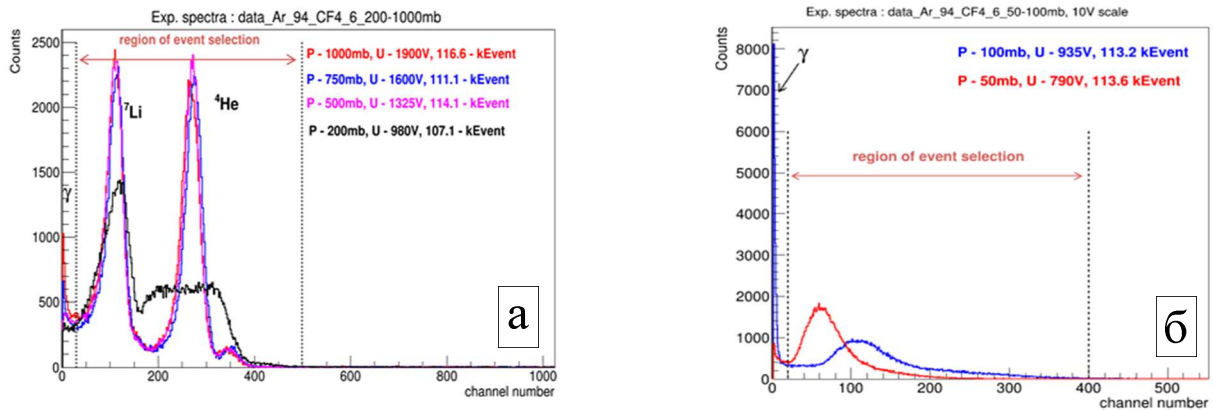


Рисунок 2.1.3.6. а) - амплитудных спектров 1000, 750, 500, и 200 мбар б) - амплитудных спектров 100 и 50мбар.

Большой объем проведенных измерений с газовым детектором медленных нейтронов с твердотельным конвертером В₄С на алюминиевой подложке и полученные результаты подтверждают готовность детектора к полноценной эксплуатации. Установка детектора на спектрометр ЮМО канала №4 реактора ИБР-2 запланирована на 2023 год.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт изготовления детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора на алюминиевой подложке от 06.06.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.3_Акт изготовления детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора на алюминиевой подложке от 06.06.22г.pdf](#)

- Акт испытаний детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора на алюминиевой подложке №1 от 14.10.22г. ФАЙЛ: [Прил._ПГ_2.1.3_Акт_испытаний_детектора_медленных_нейтронов_с_твердотельным_конвертером_из_карбида_бора_на_алюминиевой_подложке_№1_от_14.10.22г.pdf](#)

2.1.4 Изготовление и испытания позиционно-чувствительного мониторингового детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора В₄С

Механическая конструкция многопроволочных камер выполняется как правило на основе стеклотекстолитовых рамок или на основе рамок, изготавливаемых в вакуумной заливочной установке из эпоксидного компаунда с наполнителем. При этом, для облегчения сборки, её изготавливают по модульному принципу, т.е. электродные плоскости изготавливаются на отдельных рамках и стягиваются винтами через отверстия в единую сборку. Однородность регистрационных характеристик такой камеры определяется в основном точностью изготовления рамок и точностью расположения проволок. Для многопроволочной камеры с чувствительной площадью более 200x200 мм такие же требования предъявляются к точности изготовления внешней несущей металлической раме, к которой крепятся рамки с электродными плоскостями.

В ряде задач для мониторинга высокопоточных нейтронных потоков к пучковым детекторам предъявляются высокие требования. Они должны обладать хорошим пространственным и временным разрешением, с высокой эффективностью регистрации каждого взаимодействия нейтрона с материалом конвертера и малым рассеиванием для исключения влияния детектора на пучок нейтронов. Детекторы должны продолжительное время устойчиво работать в интенсивном пучке нейтронов, а количество взаимодействий с нейтронами пучка должно быть по возможности минимальным. Для уменьшения отношения сигнал/шум, где основу шума составляет гамма фон, камера должна быть с минимальным зазором анод-катод.

Особенность нового метода изготовления многопроволочных камер состоит в том, что здесь отсутствует рамочная структура, и камера изготавливается из широко распространённых материалов, выпускаемых промышленностью. Очень важной особенностью новой технологии является возможность корректировки натяжения всех электродов после закрытия камеры. Такая возможность позволяет при транспортировке камеры уменьшить натяжение анодных проволок, а после её монтажа на экспериментальной установке восстановить натяжение до требуемого значения. Отсутствие между электродами камеры диэлектрического вещества исключает скопление на нём зарядов, и, тем самым устраняется возможность образования в камере шумовых импульсов, отвечающих токам утечек.

Разработанная технология изготовления камер обеспечивает высокую точность положения электродов и, в значительной мере, устраняет зависимость механических элементов камеры от температурных изменений внешней среды и механических деформаций.

Конструкция камеры, изготовленной по новой технологии, показана на рис.2.1.4.1. Несущая рама состоит из четырёх профилей, изготовленных из дюралюминиевого двутавра 1, концы которого отфрезерованы под углом 45° и посредством уголков крепятся встык друг к другу. Разъёмы для камерной электроники крепятся по периметру рамы. Провода от разъёмов пропускаются через отверстия, просверленные в полке двутавра, и затем отверстия герметизируются эпоксидной смолой. Промышленность выпускает широкий ассортимент двутавровых профилей, которые классифицируются по номерам ГОСТа. Выбор номера профиля определяется, исходя из распределённой на него нагрузки, создаваемой натяжением электродов камеры.

Установка электродов камеры и их крепление осуществляется с помощью стержней 5 и 7, выполненных из калиброванных прутков – «серебрянки». Оба катодных электрода выполнены из алюминиевой фольги с односторонним покрытием карбидом бора ¹⁰В₄С, обращённым в сторону анодных проволок, и крепятся на стержнях 7, концы которых устанавливаются в пазы фиксатора 6. На стержнях 5 с фиксированным шагом, задаваемым спирально навитой на него проволокой, закрепляются анодные проволочки. Стержни 5 на концах также закреплены в специальных пазах фиксатора 6.

Входные окна камеры выполнены из лавсановой плёнки 20 мкм, с одной стороны металлизированной алюминием. В детекторе применены конвертеры из алюминиевой фольги размером 250x350 мм толщиной 50 мкм, на которые нанесены покрытия карбида бора, выполненные на установке VSR300 по описанной технологии. На рис. 2.1.4.2 приведено фото во время сборки регистрируемой части детектора с таким конвертером, толщина покрытия 500 нм (чёрного цвета). На фоне слоя карбида бора чёрного цвета видны анодные проволочки из позолоченного вольфрама толщиной 30 мкм.

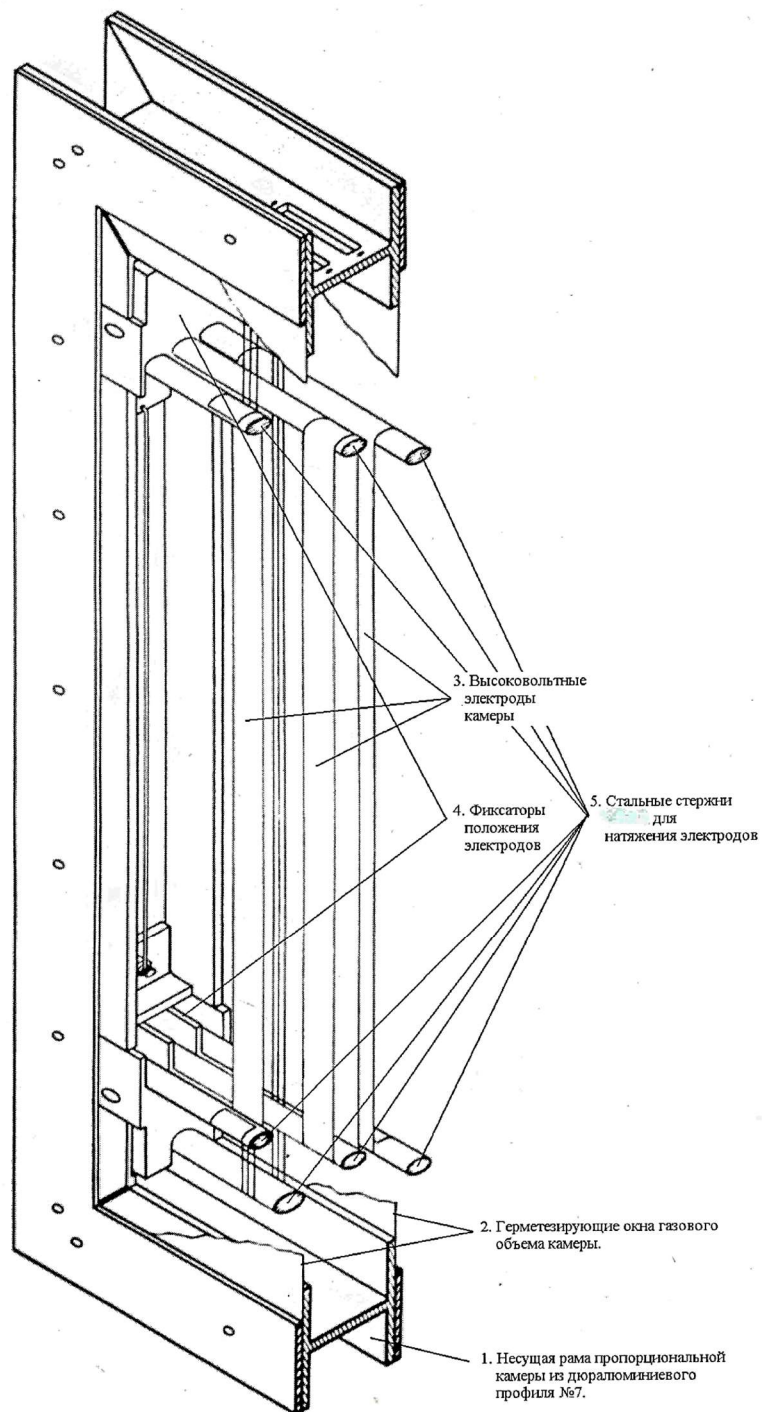
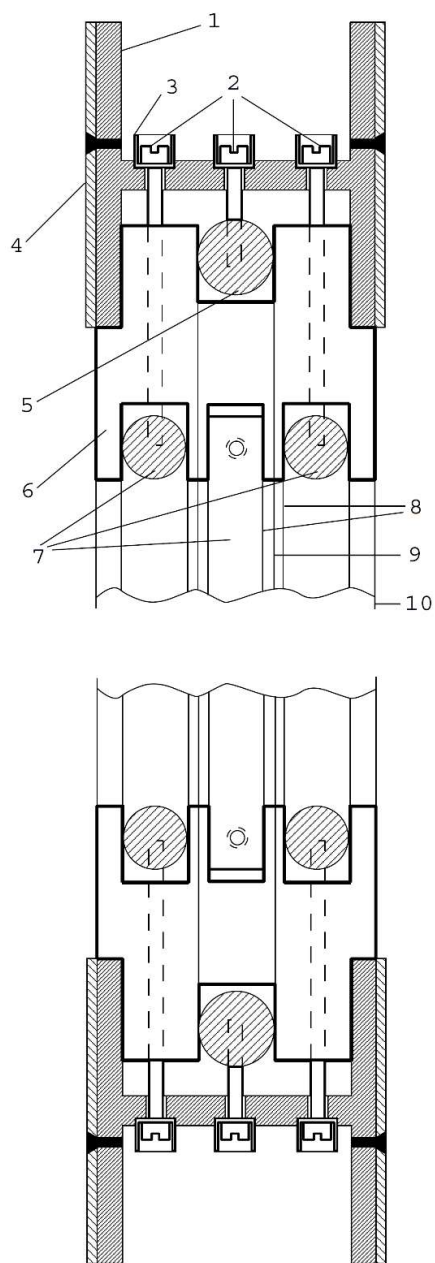


Рисунок 2.1.4.1. Слева - сечение узкоазорной камеры. Обозначения на рисунке: 1 – несущая рама, 2 – винты для натяжения анодных и катодных плоскостей, 3 – втулка для герметизации, 4 – рамка для прижима входного окна, 5 – анодный стержень, 6 – фиксатор, 7 – катодные стержни, 8 – катоды, 9 – анодные проволоки, 10 – входное окно. Справа - конструкция многопроволочной камеры.

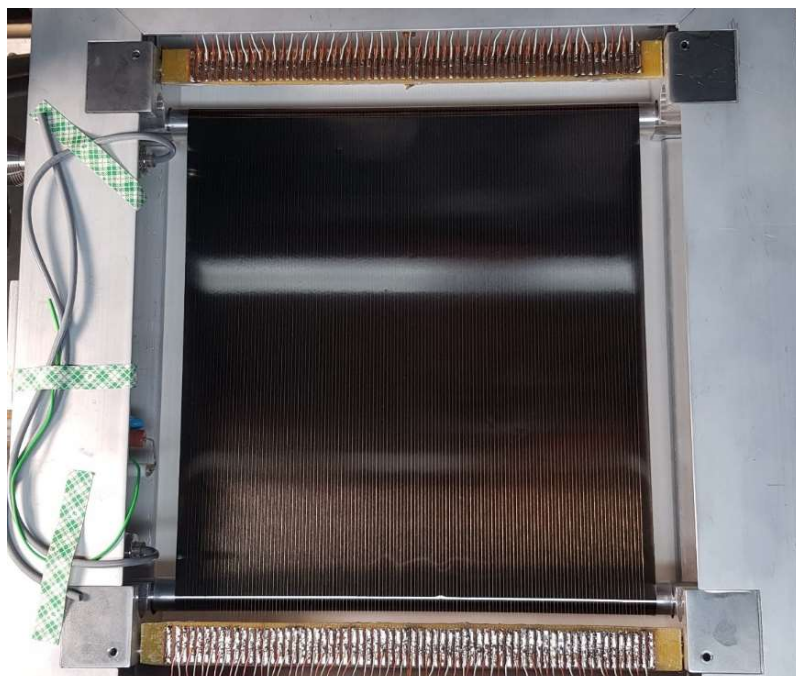


Рисунок 2.1.4.2. Регистрируемая часть детектора с конвертером из карбида бора, нанесенным на установке VSR300.

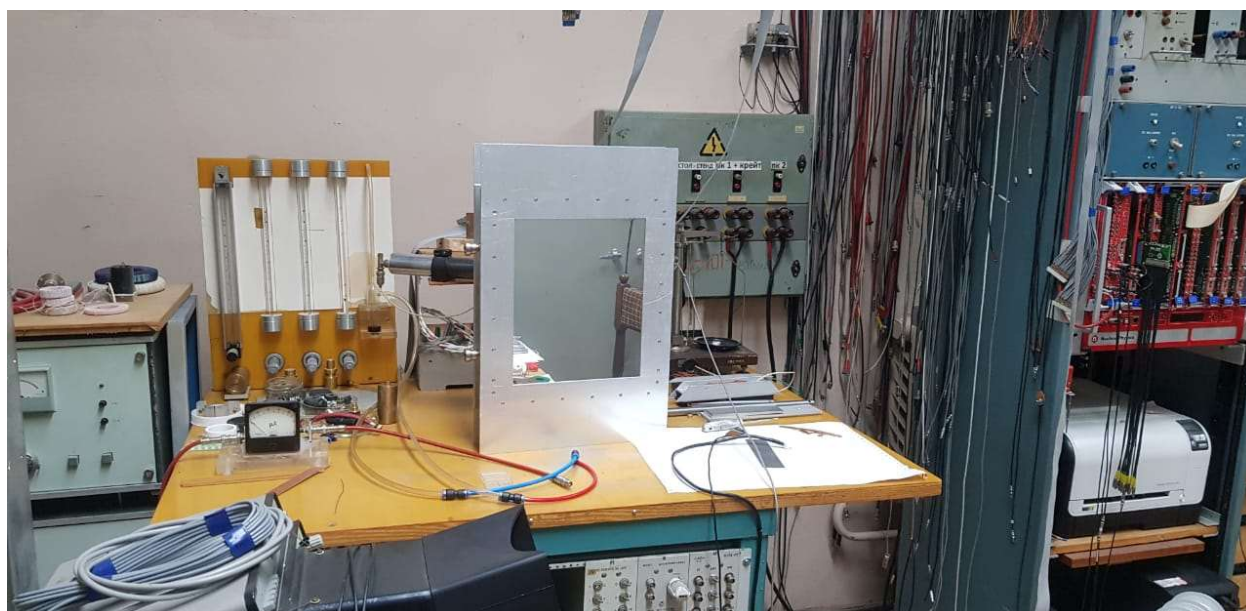


Рисунок 2.1.4.3. Тестирование изготовленного детектора.

В процессе сборки сначала производится намотка анодной проволоки, задающей координату позиционного детектора, затем закрепляются два катода из алюминиевой фольги, имеющих на одной стороне слой карбида бора B_4C , обращенный к анодным проволочкам. На рис. 2.1.4.3 приведено фото собранного детектора на испытательном стенде. Камера с обеих сторон закрыта металлизированной лавсановой пленкой, создающей эффект зеркала.

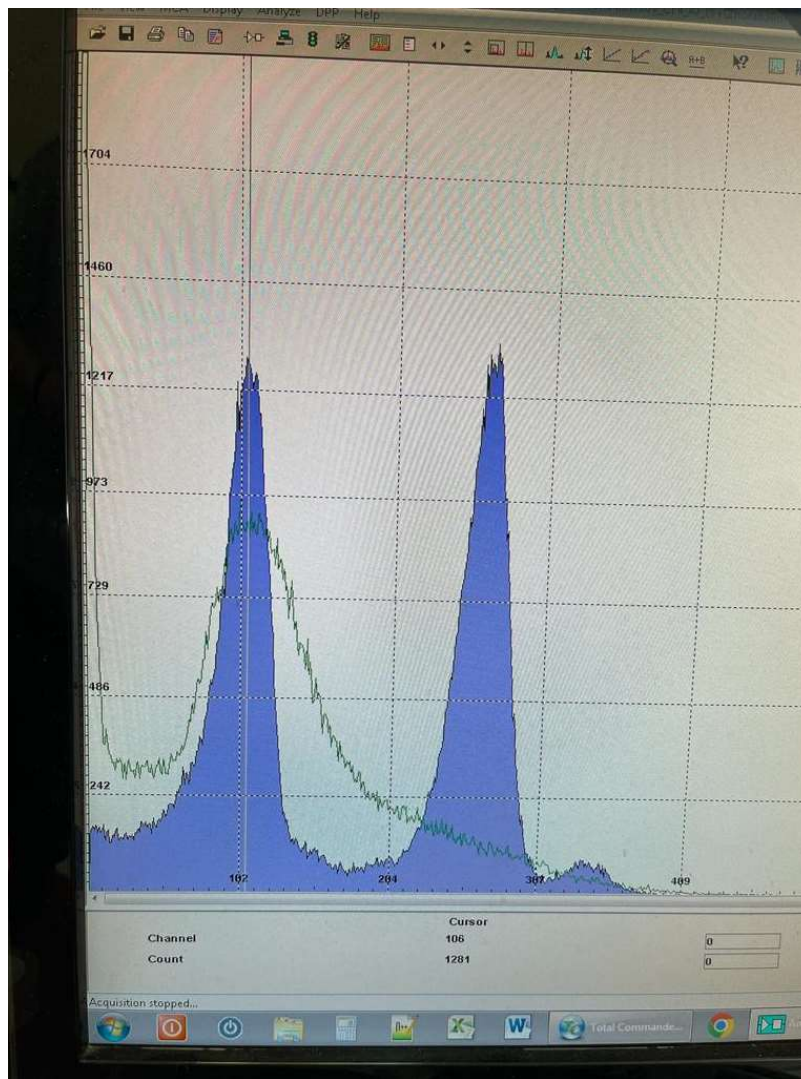
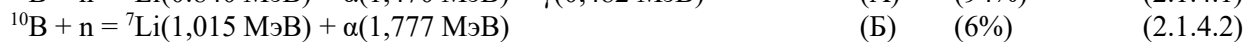
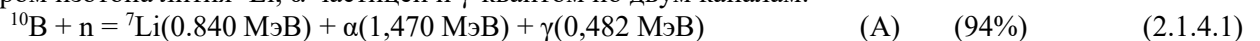


Рисунок 2.1.4.4. Амплитудный спектр при измерениях с конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

На Рисунке 2.1.4.4 представлен амплитудный спектр, полученный при измерениях с конвертером с толщиной слоя $^{10}\text{B}_4\text{C}$ – 260 нм. Измерения проводились при напряжении 2550V. Форма экспериментальных спектров хорошо согласуется с распределением энергий частиц распада изотопа бора ^{10}B . Сечение взаимодействия изотопа бора ^{10}B с тепловыми нейтронами 0,025МэВ составляет 3800 барн. Медленные нейтроны взаимодействуют с ядрами изотопа бора ^{10}B с выделением 2,78МэВ. Энергия распределяется между ядром изотопа лития ^7Li , α -частицей и γ -квантом по двум каналам:



Измерения проводились с рабочей смесью $\text{CF}_4/\text{C}_4\text{H}_{10}$ (80%/20%) при давлении 1 бар. Использовался источник ^{252}Cf .

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт изготовления позиционно-чувствительного мониторингового детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B_4C от 12.12.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.4_Акт изготовления позиционно-чувствительного мониторингового детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B4C.pdf](#)
- Акт испытаний позиционно-чувствительного мониторингового детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B_4C №1 от 16.12.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.4_Акт испытаний позиционно-чувствительного мониторингового детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B4C.pdf](#)

2.1.5 Изготовление и испытания газового позиционно-чувствительного детектора с резистивной нитью для применения на высокопоточных импульсных источниках нейтронов

В соответствии с планом-графиком работ была выполнена 2 очередь работ, и в соответствии с конструкторской документацией, разработанной в 1 очереди работ был изготовлен и собран газовый позиционно-чувствительный детектор с резистивной нитью для высокопоточных импульсных источников. Проведена его настройка и тестирование с источником нейтронов. Проведены измерения на 5 экспериментальном канале исследовательского реактора ИР-8 (Курчатовский Институт, г. Москва) для определения его параметров. По результатам работ составлены акт изготовления и акт испытаний.

Детектор представляет собой модуль из 8 позиционно-чувствительных модернизированных счётчиков (ПЧС). Модуль разработан для использования в качестве элемента систем детектирования тепловых нейтронов на экспериментальных установках. Диаметр катода каждого счётчика составляет 8 мм, длина катода 600мм. Счетчики изготовлены специально для данного модуля в ООО «НПО Консенсус». Для изготовления счётчиков использованы отечественные комплектующие.

Счетчики располагаются в два слоя на жестком основании. Количество счетчиков в каждом слое - 4 штуки. Расстояние между счетчиками в слое составляет 14 мм, счетчики во втором слое сдвинуты по горизонтали относительно первого на 7 мм, тем самым перекрывая зазор между счетчиками первого слоя. Шаг расположения счетчиков в каждом слое оптимизирован с целью минимизировать неравномерность эффективности счетчиков к тепловым нейтронам из-за цилиндрического сечения счетчиков, при максимальном перекрытии счетчиками области регистрации. Один модуль перекрывает $57 \times 586 \text{ мм}^2$ по оси, перпендикулярной аноду, но рабочая область принудительно ограничена и составляет $50 \times 560 \text{ мм}^2$. Ограничения выбраны исходя из соображений однородности эффективности в рабочей области, а также в связи с особенностями планируемого применения модулей. Для перекрытия больших площадей необходимо использовать несколько модулей с частичным перекрытием друг друга крайними счётчиками соседних модулей. Тем самым, эффективная ширина каждого отдельного детекторного модуля уменьшается. В качестве жёсткого основания применен алюминиевый профиль Bosh Rexroth 45 или аналогичный. На основания крепятся счетчики, позиционирующие элементы (проставки) и корпуса предусилителей. Проставки (уголки) добавлены для избежания провисания счетчиков при горизонтальном расположении детектора. Для крепления счетчика в корпусе предусилителя и их позиционирования предусмотрен входной коллектор. В случае необходимости на жесткое основание крепится защита от перерассеянных и фоновых нейтронов из борированной резины толщиной 5 мм или кадмия толщиной 1 мм. Изготовление и сборка детекторного модуля, настройка электронных блоков системы сбора данных проводилась в ЛНФ ОИЯИ.

Для передачи сигнала со счетчиков применены зарядочувствительные предусилители разработки ЛНФ ОИЯИ. На одной плате монтируются 4 усилительных канала, в корпусе предусилителя располагаются 2 платы. Так как сигнал снимается с обоих концов счетчика, для одного модуля требуется 8 усилительных каналов. Для задач, не требующих высокого быстродействия и координатного разрешения количество усилительных каналов может быть уменьшено в два раза путём попарного последовательного соединения счетчиков.

Регистрирующие электронные блоки, соединены с предусилителями коаксиальными кабелями нейтронного пучка на расстояние до 15 м. Тем самым снижается радиационная нагрузка на оборудование, повышается их надежность и срок службы. Вместе с тем, возможно использование кабелей меньшей длины. В измерениях на реакторе ИР-8 в соответствии с условиями измерений использовались кабели длиной 10 м.

Блоки питания предусилителей, высокого напряжения, а также блоки оцифровки сигнала были установлены в вентилируемый кейс NIM Wiener UEP22M. С предусилителей сигнал считывался с помощью двух диджитайзеров CAEN N6730, подключенных к персональному компьютеру (ноутбуку) через адаптер CAEN A4818. Высокое напряжение на модуль подавалось с первого канала высоковольтного блока CAEN 1471HA на все счетчики одновременно. Сбор данных осуществлялся с помощью программы CAEN COMPASS версии 2.1.1, данные сортировались и обрабатывались с помощью программы ExDigTube Converter, разработанной в ЛНФ ОИЯИ.

Сборочный чертёж с указанием основных частей модуля представлен на рис 2.1.5.1. На рис. 2.1.5.2 показаны фотографии компонентов детектора перед сборкой, а на рис. 2.1.5.3 а) - внешний вид модуля в сборе. Фотография детектора во время измерений на реакторе ИР-8 приведена на рис. 2.1.5.3 б).

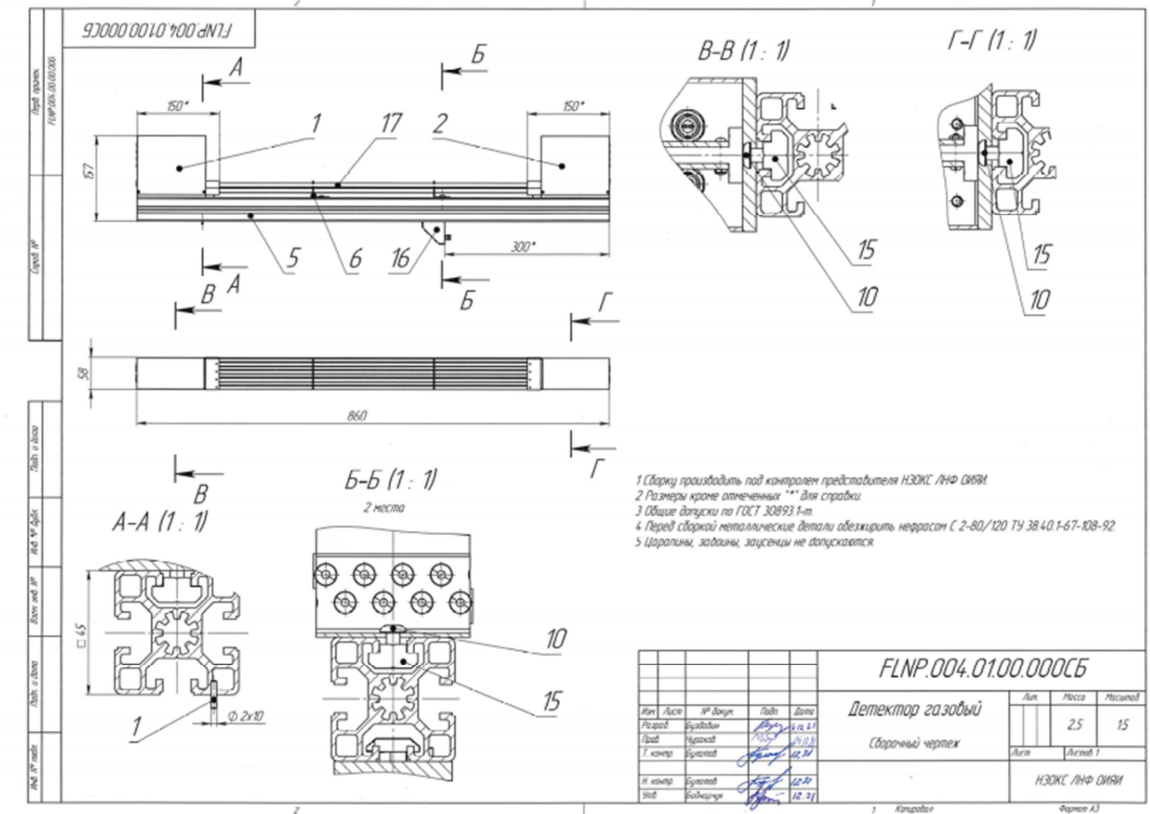


Рисунок 2.1.5.1. Чертеж детектора.

Тестирование детектора и работы по определению его параметров проводились с лабораторным источником нейтронов ^{252}Cf в ЛНФ ОИЯИ, г. Дубна, а также, на 5-м экспериментальном канале реактора ИР-8 Курчатовского Института, г. Москва. В ходе измерений с источником нейтронов была проверена работоспособность прибора, оценен диапазон рабочего напряжения, проведена настройка параметров системы накопления данных, получены сигналы отклика на тепловые нейтроны и сняты первичная счётная характеристика и координатные спектры. Осциллограммы типичного сигнала с обоих концов детектора приведены на рис. 2.1.5.4. Измерения проводились с помощью осциллографа Lecroy Waverunner 8054. Величина переднего фронта сигналов не превышала 1,5 мксек.

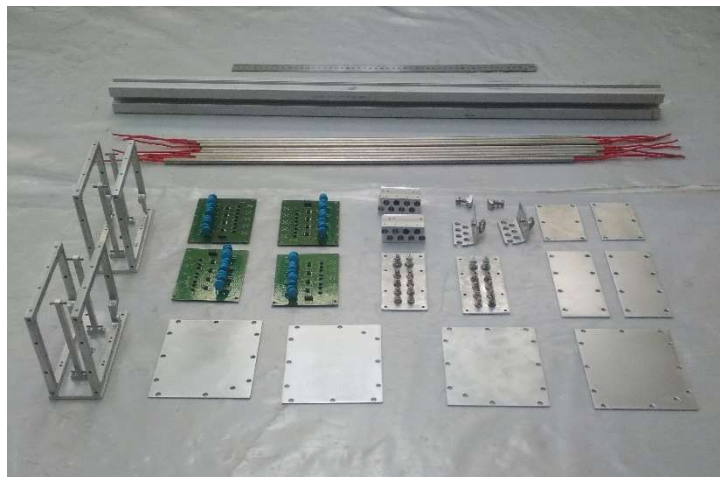
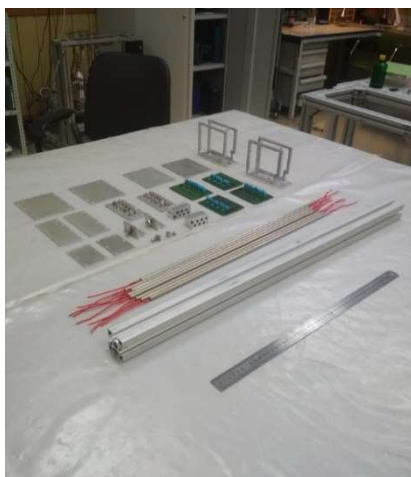


Рисунок 2.1.5.2. Компоненты детектора перед сборкой



Рисунок 2.1.5.3. а) Модуль из 8 позиционно-чувствительных счетчиков; б) Модуль в стойке на 5 канале реактора ИР-8

Измерения на 5-м канале реактора ИР-8 проводились в период времени с 09.12.2022 по 13.12.2021. Целью работ было определение возможности применения детектора на установках, работающих в области исследования конденсированного состояния вещества методами рассеяния нейтронов: нейтронных диффрактометрах, рефлектометрах и малоугловых установках.

Модуль устанавливался на детекторной стойке из алюминиевого профиля. На передней грани стойки были закреплены две направляющие, позволяющие двигать модуль в вертикальной плоскости. Модуль расположен вертикально с точностью $\pm 0,2^\circ$ (измерялись лазерным дальномером Leica Disto X310). Положение стойки на 5 канале: от передней (белой) стенки биологической защиты реактора до передней грани стойки 2,05 м. Для измерений координатного разрешения прямой пучок, размерами 8x8 см перекрывался плексигласовым ослабителем. Характер нейтронной нагрузки эмулировал работу детектора в рассеянном пучке на высокопоточных исследовательских установках. Области детектора, не перекрытые маской, были экранированы кадмиевыми листами.

Перед счетчиками находилась щелевая маска из кадмия, полностью перекрывающая прямой поток нейтронов. Щели маски расположены в прямом пучке горизонтально. Расстояние между щелями 20 мм, ширина щели 0,3 мм. Щели расположены перпендикулярно оси счетчиков, и целиком перекрывают модуль. Расстояние от передней грани профиля детекторного модуля до переднего края маски 8,5 см. Ориентация модулей (право-лево) такая, как будто экспериментатор стоит спиной к реактору и смотрит на детектор. Типовое время одного измерения 100 секунд.

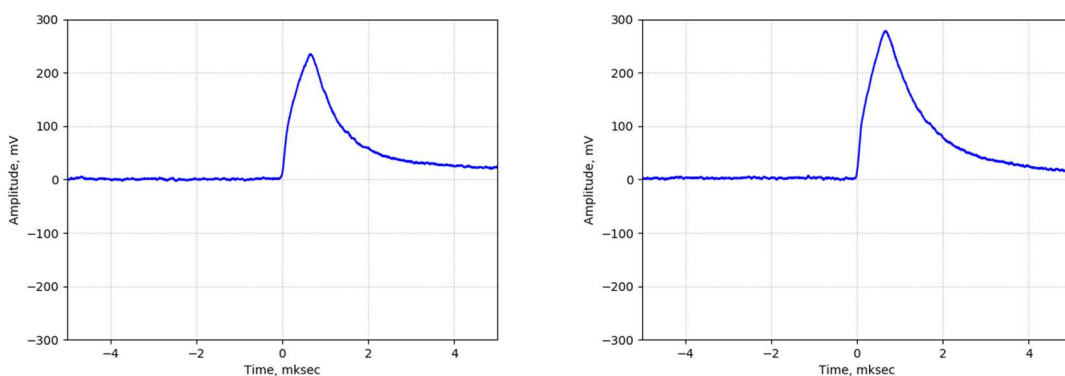


Рисунок 2.1.5.4. Осциллограммы сигнала от нейтрона. Слева - сигнал с левого конца счётчика, справа - сигнал с правого конца счетчика. Счетчик №1, напряжение на аноде +1350 В, осциллограф Лесрой Waverunner 8054, порог 10 мВ.

После установки оборудования, подключения аппаратуры и первичной настройки детектора была проведена корректировка положения детектора, с целью одновременной засветки всех счетчиков нейтронами. Были сняты счётные характеристики модуля при напряжении от +1100 В до +1450 В. Рабочее напряжение для модуля +1350В. Счетные характеристики для двух различных точек детектора представлены на рис. 2.1.5.5. Незначительное расхождение в счёте трубок можно объяснить неоднородностью падающего пучка (см. координатные спектры). Далее была проведена калибровка детектора с целью определить соответствие цифровых каналов диджитайзера пространственным каналам, проведены измерения для оценки зависимости разрешения от параметров диджитайзера, измерено координатное разрешение при различных значениях высокого напряжения и в различных точках чувствительной области модуля. Форма импульсов сигналов от нейтронов соответствовала измеренной на источнике.

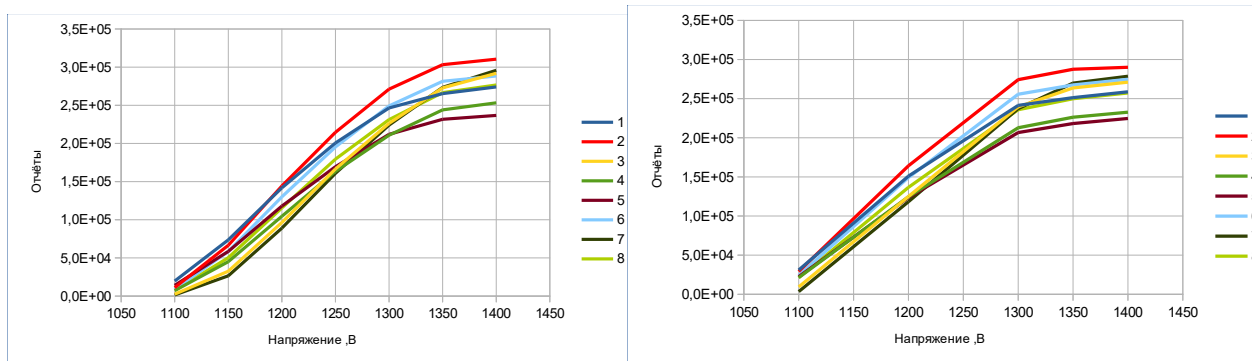


Рисунок 2.1.5.5. Счетные характеристики модуля из 8-трубок. Слева - крайнее верхнее положение модуля в пучке. Измерено на 5-м канале ИР-8 12.12.2022. Время измерения одной точки 100 секунд. Справа - модуль на 20 см ниже крайнего верхнего положения. Измерено на 5 канале ИР-8 12.12.2022, измерения 50-54. (для ускорения измерения точки 1150 и 1250 пропущены) Время измерения одной точки 100 секунд.

Примеры калибровочных координатных спектров детекторов со щелевой маской приведены на рис. 2.1.5.6. На рисунках по оси координат - нормированное значение координаты X (разделенное на максимум диапазона измерений, свой для каждого счетчика). Цена деления в мм определялась из расстояния между пиками от щелей. По результатам измерений пространственное разрешение модуля при рабочем значении напряжения можно оценить как 3,2 мм, что составляет ~ 0,5% от длины счетчика. Оценка результатов измерения проводилась с использованием программного комплекса ROOT 6.

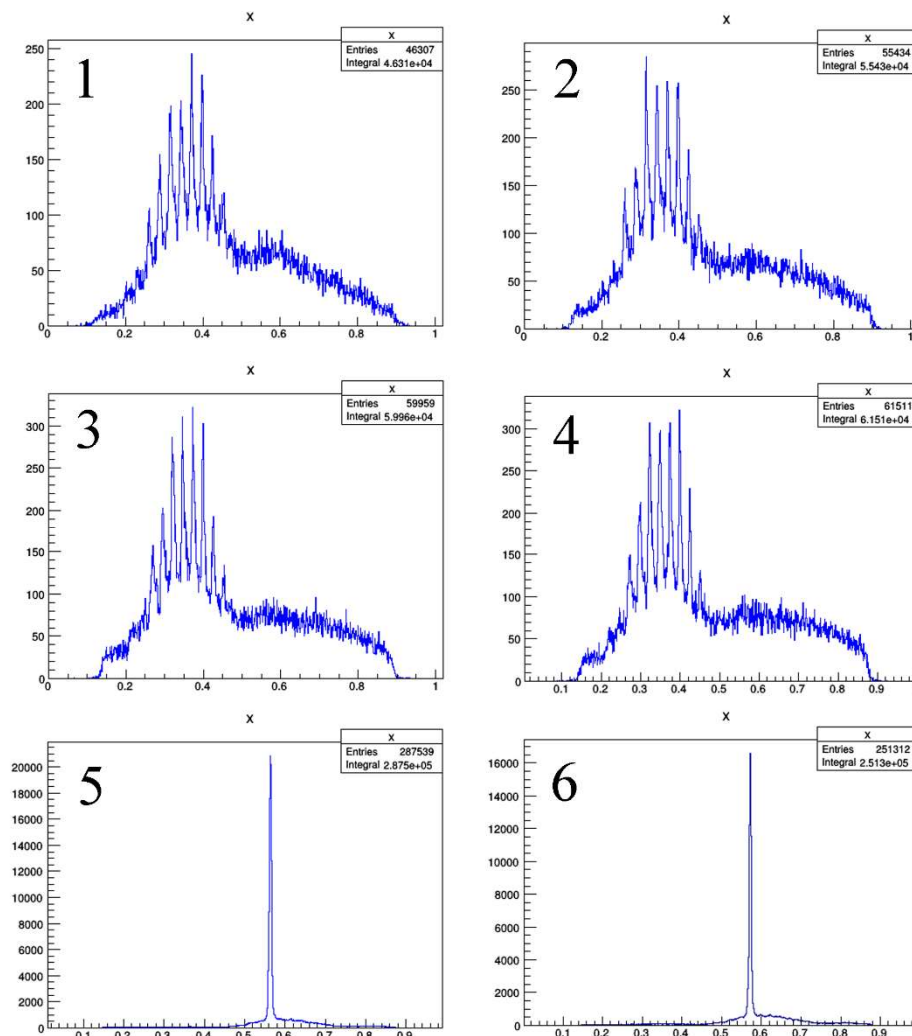


Рисунок 2.1.5.6. Калибровочные координатные спектры. В прямом пучке ослабитель - 30 мм плексиглас. Время измерения 100 секунд. 1) счетчик №7. Все щели открыты. Напряжение +1300 В, 2) счетчик №7. Все щели открыты. Напряжение +1350 В, время измерения 100 секунд. 3) Счетчик №6. Все щели открыты. Напряжение +1350 В, время измерения 100 секунд. 4) Счетчик №2. Все щели открыты. Напряжение +1350 В, время измерения 100 секунд. 5) Счетчик №2. Открыта только одна щель. 6) Счетчик №1. Открыта только одна щель.

Характеристики детектора, полученные в результате измерений, приведены в Акте измерений. По результатам измерений принято решение ограничить размер рабочей области модуля значением 50x560 мм². для обеспечения гарантированной однородности и применения его в составе многомодульных детекторных систем. Вместе с тем ширина чувствительной области одного модуля составляет 57 мм, что может быть использовано при работе детектора, состоящего из единственного модуля.

Для оценки возможности работы модуля в условиях высокоинтенсивных пучков детектор засвечивался прямым пучком с уменьшенной толщиной ослабителя, либо без ослабителя, при этом загрузка детектора значительно превышала возможности современных систем сбора данных. После снятия высокоинтенсивных нагрузок детектор возвращался в штатный режим работы без изменения параметров.

Работа на высокопоточных импульсных источниках нейтронов требует повышения максимальной загрузки детекторов, также как и общей скорости счета детекторной системы.

Схема многослойного расположения счётчиков позволяет улучшить загрузочную способность всей системы в целом. При многослойном расположении возможно применение счетчиков с меньшей эффективностью, не приводящее к существенному уменьшению эффективности детекторной системы в целом, но снижающая загрузку отдельного счетчика. Тем самым уменьшаются требования к быстродействию регистрирующей электроники и к «мертвому времени» счетчика. При этом количество самого дорогостоящего компонента счетчиков - газа конвертера нейтронов ³He в детекторной системе не

увеличивается, и увеличение быстродействия системы получается за счет увеличения количества регистрирующих каналов.

Полученные результаты показали надёжную и устойчивую работу модуля в условиях относительно высокой радиационной загрузки на канале 5 реактора ИР-8. При работе в прямом пучке, интенсивность которого заведомо превышает пропускную способность системы накопления данных, система и модуль восстанавливают работоспособность после прекращения перегрузок. Параметры прибора соответствуют требуемым. Полученное координатное соответствует координатному разрешению лучших современных иностранных счётчиков. Увеличение порога регистрации позволяет дальнейшее улучшение разрешения за счёт уменьшения эффективности регистрации. Детекторы на основе модулей данного типа могут применяться в рассеянном образцом на существующих высокоинтенсивных установках исследования конденсированного состояния вещества.

В ходе работ выявилась необходимость обеспечения надёжного охлаждения системы сбора и накопления данных (диджитайзеров), особенно во время работы при значительных нагрузках. Во время сборки модуля в ходе подготовки к измерениям были предложены изменения конструкции модуля ведущие к повышению надёжности прибора и упрощению сборки, что важно при серийном изготовлении.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт изготовления газового позиционно-чувствительного детектора с резистивной нитью от 31.10.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.5_Акт изготовления газового позиционно-чувствительного детектора с резистивной нитью от 31.10.22г.pdf](#)
- Акт испытаний газового позиционно-чувствительного детектора с резистивной нитью №1 от 13.12.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.5_Акт испытаний газового позиционно-чувствительного детектора с резистивной нитью №1 от 13.12.22г.pdf](#)

2.1.6 Разработка конструкции механического прерывателя пучка нейтронов с временной фокусировкой

На импульсных источниках нейтронов наиболее удобной методикой проведения измерений является метод времени пролета, в котором скорость нейтронов определяется по времени пролета расстояния от источника до детектора с началом отсчета времени в момент импульса. Для определения скорости нейтронов с хорошим разрешением важно, чтобы в канал распространения пучка не попали нейтроны, излученные в моменты времени за пределами временной ширины импульса источника, иначе такие нейтроны будут смешиваться с нейтронами, излученными в период длительности импульса, и будут вносить искажения в определение величины скорости зарегистрированных нейтронов. Задача разрабатываемого прерывателя как раз и состоит в поглощении нейтронов, родившихся вне импульса источника.

Принцип работы такого прерывателя легко проиллюстрировать с помощью временной диаграммы, на которой по оси абсцисс откладывается время, а на оси ординат – пролетная база (Рис. 2.1.6.1)

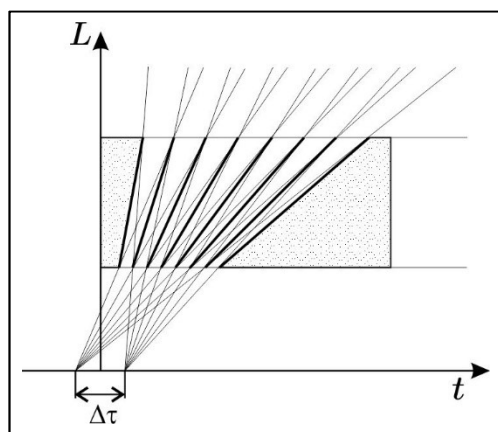


Рисунок 2.1.6.1. Времяпролетная диаграмма механического прерывателя пучка с временной фокусировкой. Никакие нейтроны, кроме тех, что были излучены в интервале времени $\Delta\tau$, не смогут попасть в детектор.

Разрабатываемый прерыватель пучка (Рис. 2.1.6.2 а) позволяет уменьшить временное окно видимости источника Δt и тем самым убрать из пучка нейтроны, излученные вне импульса источника. Достигается это тем, что прерыватель имеет форму цилиндра и его окно представляет собой набор узких расходящихся

каналов без прямой видимости, каждый из которых может пропустить строго определенный диапазон скоростей нейтронов лишь в требуемом диапазоне времени (Рис. 2.1.6.1). Величина этого интервала и его положение на временной оси будет определяться конкретными характеристиками конструкции. Для реактора ИБР-2, очевидно таким интервалом должен быть выбран импульс реактора.

Рассмотрим прерыватель с линейно изменяющейся угловой шириной наклонных каналов, представляющий собой цилиндр с секторальными вырезами вблизи поверхности (Рис. 2.1.6.2 а). Для его описания удобнее всего использовать цилиндрическую систему координат (Рис. 2.1.6.2 б). Геометрию каждого канала можно описать следующим образом. Положение центра начала каждого канала характеризуется углом φ_0^k . Угловая координата канала вдоль оси Z задается выражением:

$$\varphi^k(z) = \varphi_0^k + \alpha^k z, \quad (2.1.6.1)$$

где α^k – коэффициент определяющий угол k -го канала по отношению к образующей цилиндра. Ширина каналов увеличивается линейно вдоль оси Z согласно выражению:

$$\Delta\varphi(z) = \Delta\varphi_0 + \beta z, \quad (2.1.6.2)$$

где $\Delta\varphi_0$ – начальная ширина канала, β – коэффициент, описывающий его уширение.

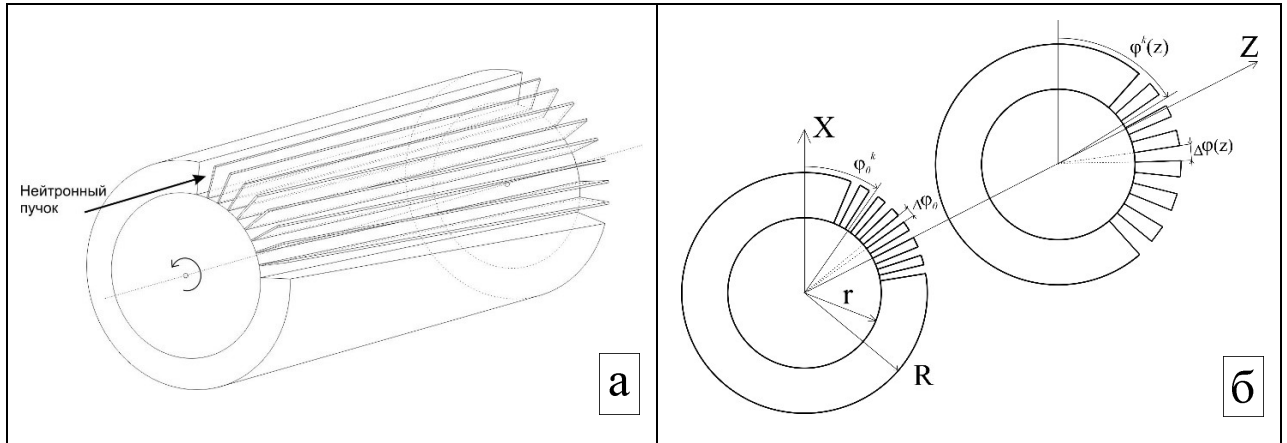


Рисунок 2.1.6.2. Механический фильтр нейтронного пучка с временной фокусировкой. а) общий вид фильтра; б) детальная конфигурация каналов механического фильтра в цилиндрической системе координат.

Каждый индивидуальный канал фильтра настроен на пропускание пучка нейтронов с определенным спектральным интервалом. Конфигурацией каналов фильтра должны быть такой, чтобы на время–пролетной диаграмме продолжения их стенок сфокусированы в точку $t = 0$ (Рис. 2.1.6.3).

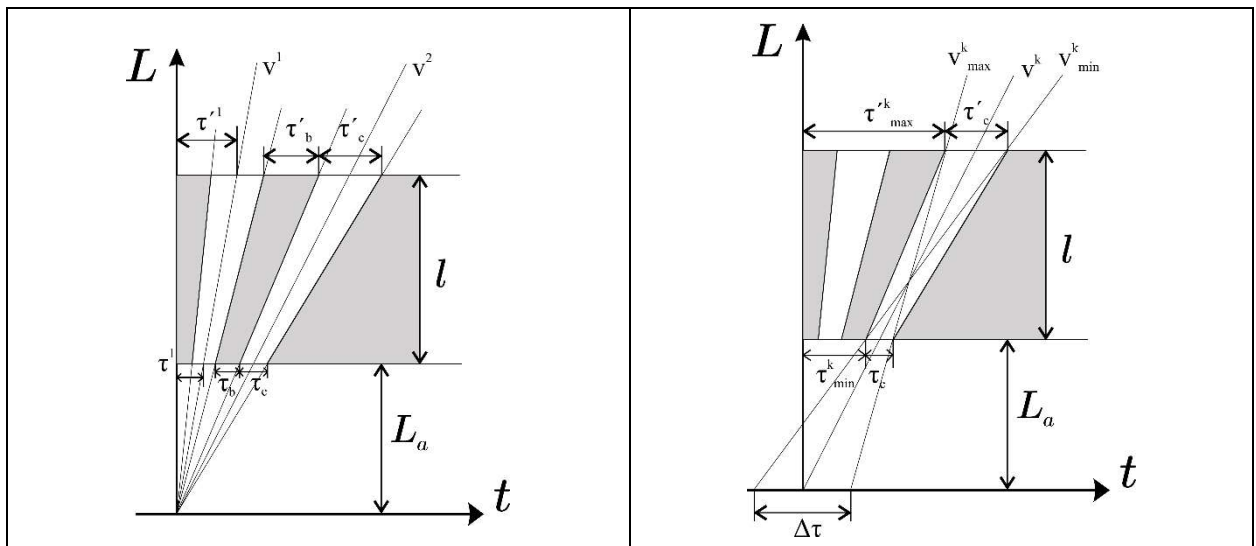


Рисунок 2.1.6.3. Время–пролетная диаграмма для фильтра с линейно увеличивающейся толщиной перегородок. Каналы сфокусированы в точку $t = 0$.

Вариантом изготовления такого устройства может быть последовательный набор дисков из поглощающего нейтроны материала с секторальными вырезами, с последовательным увеличением ширины по ходу движения нейтронов. При Монте-Карло моделировании такого устройства применялась именно такая модель (Рисунок 2.1.6.4). Длина механического фильтра 50 см. Количество каналов - 102. Фильтр располагается на расстоянии $L_a = 5$ м от источника нейтронов. Конфигурация каналов подобрана таким образом, чтобы спектр нейтронов на выходе имел диапазон от 1 до 15 Å. Высота каналов $R - r = 10$ см, радиус цилиндра $R = 20$ см (Рисунок 2.1.6.2 б). Значение углового размера каналов в передней части фильтра $\varphi_d = 1.031^\circ$.

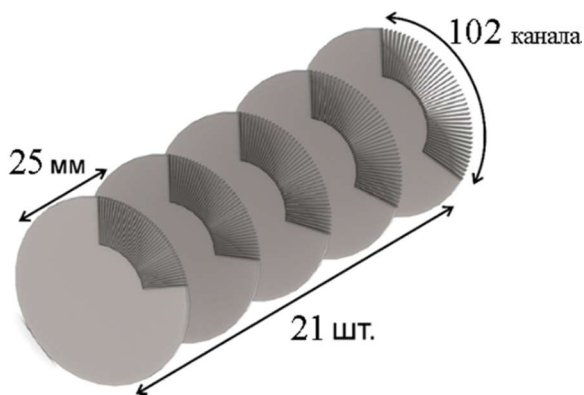


Рисунок 2.1.6.4. Схема фильтра, используемого при Монте-Карло моделировании в программном пакете VITESS. Применяется последовательность из 21 дисковых прерывателей (для наглядности на рисунке отображено только 5 прерывателей).

Результаты работы по уменьшению времени видимости источника фильтра данной конфигурации представлены на рисунке 2.1.6.5.

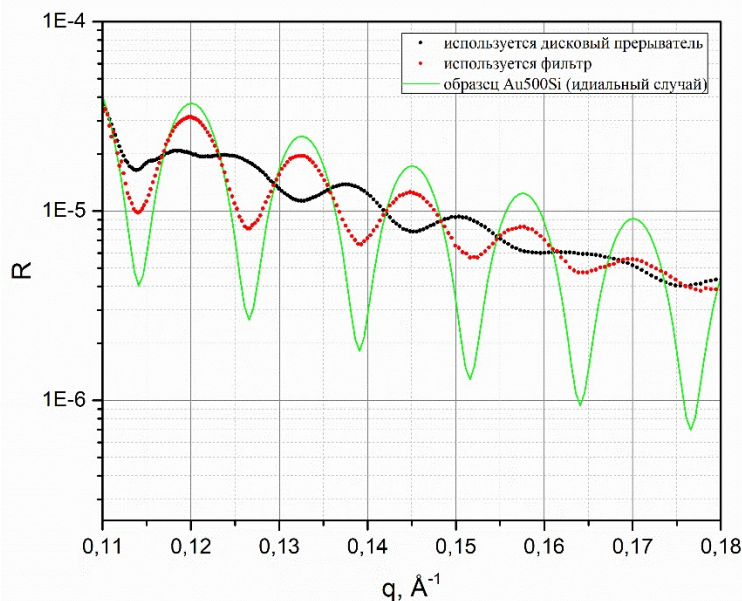


Рисунок 2.1.6.5. Результат работы фильтра и сравнение с дисковым прерывателем. Уменьшение времени видимости источника нейтронов в результате работы фильтра приводит к лучшему разрешению.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Конструкторская документация на механический прерыватель пучка нейтронов с временной фокусировкой. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.6_Конструкторская документация на механический прерыватель пучка нейтронов с временной фокусировкой.pdf](#)

2.1.7 Расчёт конфигурации нейтронОВОДНОЙ системы дифрактометра для импульсного источника нейтронов моделированием методом Монте-Карло с применением программного пакета VITESS McStas

Экспериментальные данные, полученные методом дифракции нейтронов, позволяют получить сведения об атомной структуре кристаллических решеток различных веществ. Использование нейтронов позволяет получать данные, недоступные для методов, в которых применяются рентгеновские лучи и электроны в силу особенностей взаимодействия с ядрами атомов [2.1.7.1, 2.1.7.2]. Например, для нейтронов доступно исследование органических соединений, изучение длины и формы водородных связей, определение положения атомов водорода. Изучение структуры систем, состоящих из изотопов одного и того же химического элемента. Исследование структуры соединений, содержащих элементы как сильно отличающимися атомными номерами, так и из элементов с близкими номерами (например, соединения PbS, FeCo, WO₂, Ni₃Mn). Кроме того, взаимодействие нейтронов с магнитным полем позволяет проводить исследования с магнитными структурами [2.1.7.3].

Естественным образом следует полагать, что одной из важнейших характеристик нейтронного дифрактометра является интенсивность потока нейтронов на исследуемом образце. Увеличение интенсивности позволяет, во-первых, повысить качество данных (или сократить время измерений), во-вторых, открывает возможность произвести исследования образцов малого объема и (или) образцов со слабым взаимодействием с нейтроном. С этой целью на установках нейтронного рассеяния применяются зеркальные нейтронОВОДЫ, помещенные в вакуумный кожух. [2.1.7.4, 2.1.7.5] Система зеркал позволяет получить большой поток нейтронов за счет отражения, а вакуумирование снижает потери потока при процессах поглощения и рассеяния. Используя изогнутый нейтронОВОД можно избавиться от прямой видимости поверхности замедлителя и тем самым ограничить поток быстрых нейтронов и гамма-квантов. Это позволяет улучшить фоновые условия для измерений времяпролетных спектров, что особенно важно для импульсного реактора типа ИБР, где поток нейтронов между импульсами ненулевой [2.1.7.6]. Наряду с изогнутым нейтронОВОДОМ для улучшения фоновых условий может быть использовано устройство [2.1.7.7].

Технология создания нейтронОВОДОВ в настоящее время хорошо развита, нейтронОВОДными системами снабжены множество спектрометров во многих нейтронных центрах. Задача по созданию нейтронОВОДНОЙ системы должна быть поставлена в соответствии с требованиями к конкретному инструменту нейтронного рассеяния. Для каждой конкретной установки могут быть свои требования к пучку, например, такие как:

- поперечное сечение пучка в месте нахождения образца;
- требуемые фоновые условия;
- необходимый спектр;
- расходимость пучка;
- габаритные размеры замедлителя нейтронов;
- расстояние от замедлителя до образца и детекторной системы;

Отражающая способность покрытия зеркал нейтронОВОДА обозначается как m и определяется по отношению к таковой для поверхности полированного природного никеля (для никеля соответственно $m=1$). Лучшей отражающей способности можно добиться с помощью многослойной тонкопленочной структуры. В таких структурах наложение брэгговских дифракционных пиков приводит к улучшению коэффициента отражения и позволяет получить значение $m > 1$. Очевидно, что получение большего значения m , требует лучшего технологического процесса а значит и приводит к большей стоимости итогового изделия. Поэтому при ограниченном бюджете требуется уделить внимание оптимизации нейтронОВОДНОЙ системы по параметру цена-качество.

Расчёт конфигурации нейтронОВОДНОЙ системы дифрактометра для импульсного источника нейтронов был выполнен с применением метода Монте-Карло посредством программного пакета VITESS. Данный программный пакет широко используется нейтронографическим сообществом и позволяет спроектировать различные установки нейтронного рассеяния, и произвести таким образом оптимизацию различных узлов инструмента [2.1.7.8].

Модель для изучения эффективности различных конфигураций нейтронОВОДА включала в себя источник нейтронов (замедлитель) с габаритами 20 см x 20 см. Расстояние от поверхности замедлителя до начала нейтронОВОДА было задано 5 м, как характерное для исследовательского реактора ИБР-2, в связи с необходимостью использования массивной биологической защиты. В таком случае оптимальным размером сечения нейтронОВОДА является величина 150 мм. Большой размер приводит к неполной загруженности нейтронОВОДА. Предлагаемый для использования и оптимизации вариант нейтронОВОДА состоит из трех

частей. Первая часть – изогнутый в горизонтальной плоскости нейтронотвод длиной 9 м и радиусом кривизны 250 м, прямоугольного сечения 60 мм по горизонтали и 150 мм по вертикали с покрытием отражающих зеркал $m=2$ (сечение по горизонтали 60 мм вместо оптимальных 150 мм выбрано, чтобы не было прямой видимости замедлителя). Затем следует прямая часть того же сечения с аналогичным покрытием зеркал и длиной 10 м. Последняя часть была выполнена в трех вариантах для поиска наилучшей эффективности (Рис. 2.1.7.1).

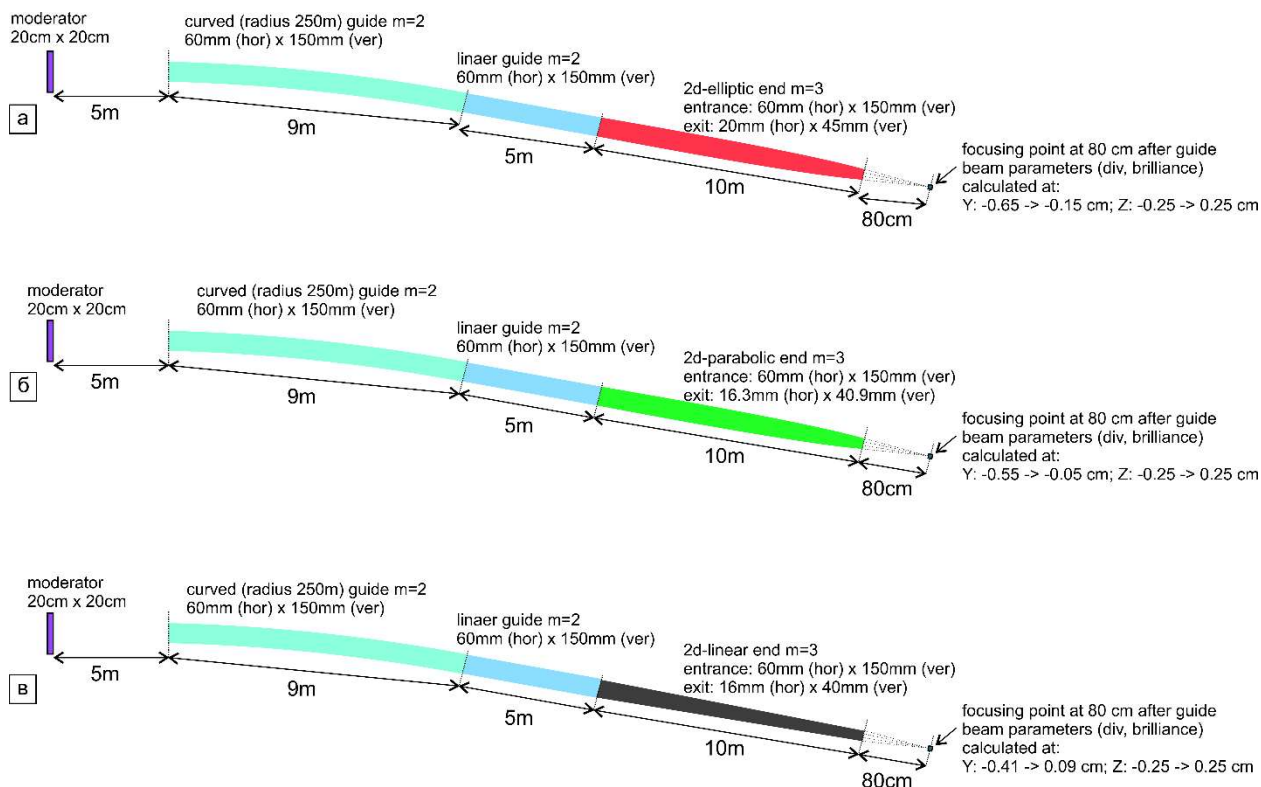


Рисунок 2.1.7.1. Схема предлагаемой нейтронотводной системы. а) последняя секция нейтронотвода имеет эллиптическую форму в обеих плоскостях OY и OZ. б) последняя секция имеет параболическую форму в обеих плоскостях. в) последняя секция линейно сужается в обеих плоскостях.

Одним из вариантов было использование эллиптической формы нейтронотвода в обеих плоскостях позволяющий сфокусировать пучок в двумерном пространстве с расположением точки фокуса на расстоянии 80 см от выхода нейтронотвода. В таком случае сечение на выходе 20 мм x 45 мм (Рис. 2.1.7.1а). Следующий рассматриваемый вариант параболическая форма в обеих плоскостях отражающих зеркал с тем же расстоянием до точки фокуса 80 см. В этом случае сечение на выходе нейтронотвода составляет величину 16.3 мм x 40.9 мм (Рис. 2.1.7.1б). И последний рассматриваемый вариант и наиболее простой в реализации – линейно сужающаяся форма нейтронотвода также в обеих плоскостях. Для данной модели сечение на выходе 16 мм x 40 мм, близкое к используемому во втором случае (Рис. 2.1.7.1в). Во всех трех вариантах нейтронотводной системы длина последней секции 10 м, а отражающая способность зеркал $m=3$.

Дополнительно была создана модель с линейным участком нейтронотводной системы вместо изогнутого, для сравнения итоговых спектров, и подтверждения ухода от прямой видимости замедлителя в случае изогнутого нейтронотвода.

Для дифрактометра характерный размер пучка нейтронов на образце составляет величину 5 мм x 5 мм, спектр 1 – 10 Å, расходимость пучка $\pm 2^\circ$. Поэтому для оценки параметров пучка в результате данные параметры были ориентировочными. Значения интенсивностей нейтронов в месте расположения образца на площади 5 мм x 5 мм, в результате Монте-Карло моделирования описанных выше конфигураций, представлены на рисунке 2.1.7.2 (здесь и далее данные отображаемые красным цветом соответствуют нейтронотводу с эллиптической секцией в конце, зеленым – параболической, черным – линейно сужающейся). Интенсивность нейтронов в следствие применения изогнутого нейтронотвода становится неравномерной в поперечном направлении к пучку во всех рассматриваемых конфигурациях (Рис. 2.1.7.3). Поэтому измерение интенсивности производилось в области с наибольшей интенсивностью, которая наблюдалась на некотором расстоянии относительно оси нейтронотводной системы. Для каждой конфигурации это смещение оказалось индивидуальным (Рис. 2.1.7.3, 2.1.7.4).

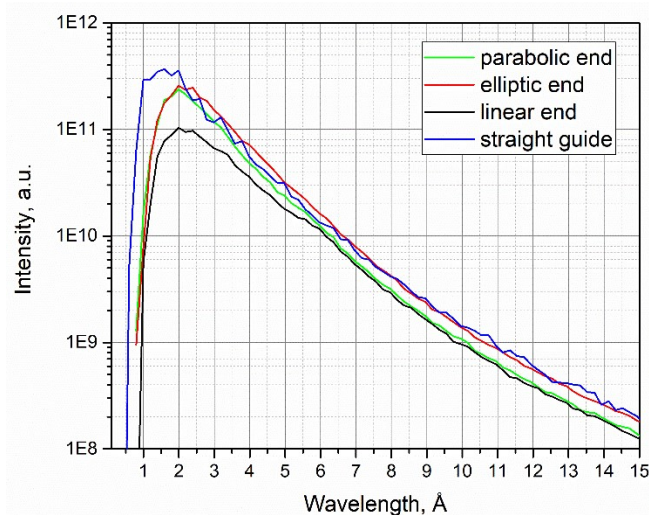


Рисунок 2.1.7.2. Интенсивность нейтронов, полученная в области 5 мм x 5 мм, на месте расположения образца на расстоянии 80 см от выхода нейтронновода. Синим указаны данные, получение при прямом нейтронноводе длиной 24 м постоянного сечения 60 мм x 150 мм.

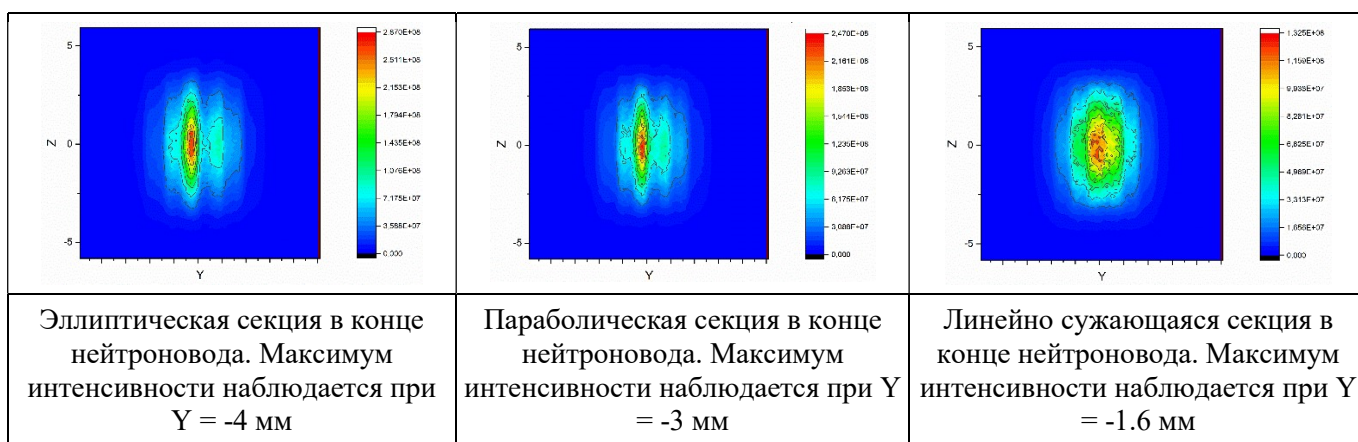


Рисунок 2.1.7.3. Интенсивность нейтронов в поперечном сечении в месте расположения образца для трех конфигураций нейтронноводной системы.

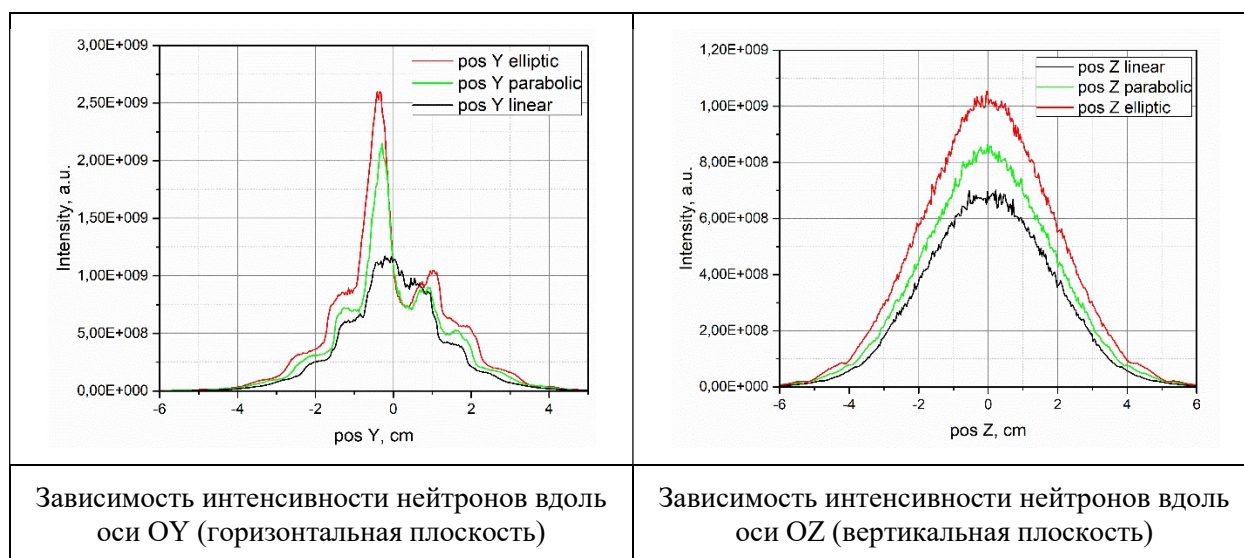


Рисунок 2.1.7.4. Зависимость интенсивности нейтронов от поперечной координаты в месте расположения образца.

Расходимость пучка также рассматривалась в области размером 5 мм x 5 мм с максимальной интенсивностью на расстоянии 80 см от выхода нейтроновода (Рис. 2.1.7.5).

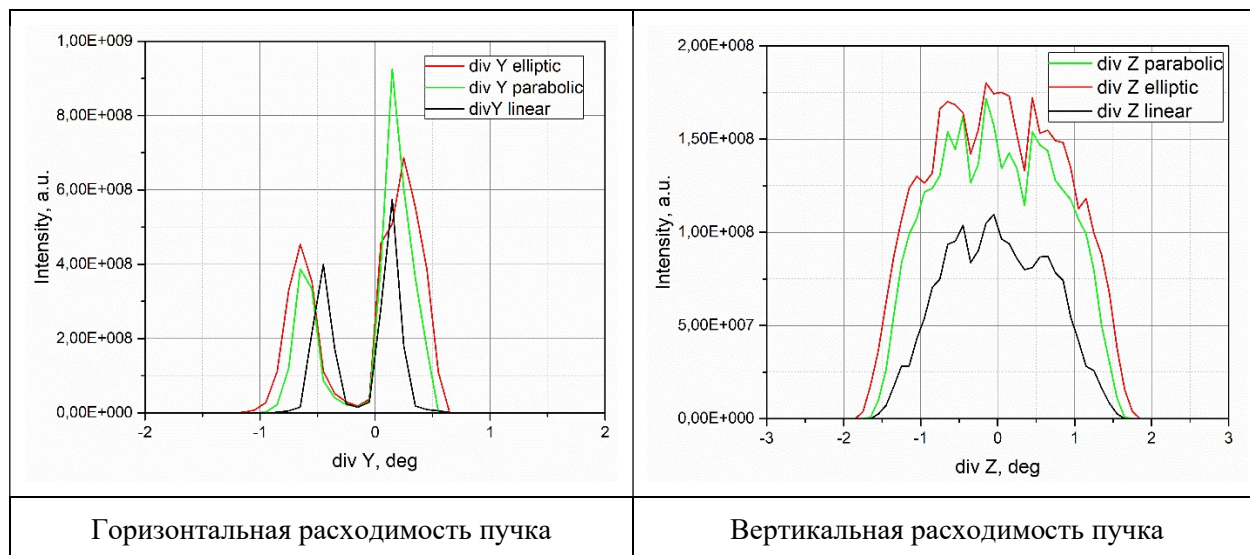


Рисунок 2.1.7.5. Расходимость пучка в месте размещения образца в области 5 мм x 5 мм.

Результаты моделирования демонстрируют, что наибольшего потока на образце можно добиться, установив эллиптическую фокусирующую секцию в конце нейтроновода (Рис. 2.1.7.1а). Изогнутая часть позволяет избавиться от прямой видимости замедлителя и тем самым уменьшить количество быстрых нейтронов и гамма-квантов, что приведет к улучшению фоновых условий. Однако, как видно из рис. 2.1.7.5 расходимость пучка в такой конфигурации является наибольшей. Поэтому в некоторых экспериментах, возможно, придется дополнительно проводить коллимацию пучка. Также важным является результат, продемонстрированный на рис. 2.1.7.3, 2.1.7.4, указывающий на неоднородность интенсивности в поперечном сечении пучка. Это является нежелательным свойством изогнутого нейтроновода. В процессе прохождения через нейтроновод увеличивается концентрация нейтронов с малыми длинами волн около внешней стенки. Возникают так называемые «гирляндные» отражения и распределение потока на выходе становится неравномерным. Для уменьшения этого эффекта во всех трех конфигурациях после изогнутой части устанавливалась прямая секция длиной 5 м (рис. 2.1.7.1). Однако, как видно из результатов моделирования, полностью от такого эффекта избавиться не удалось. В таком случае, имеет смысл устанавливать образец не на оси нейтроноводной системы, а с некоторым смещением (как это делалось при измерении интенсивности и расходимости пучка).

Методом Монте-Карло с применением программного пакета VITESS было смоделировано несколько конфигураций нейтроноводной системы. Было установлено, что из предложенных вариантов, наибольшую интенсивность позволяет получить нейтроновод с эллиптической секцией в конце. Однако, в данном случае расходимость пучка также максимальна среди трех предложенных вариантов. Было продемонстрировано, что применение изогнутой секции в нейтроноводной системе избавляет от прямой видимости поверхности замедлителя, что в свою очередь снижает количество быстрых нейтронов и гамма-квантов. При правильном применении это позволит уменьшить уровень фона экспериментальной установки.

Следующим этапом следует провести оптимизацию по следующим параметрам:

- цена-эффективность нейтроноводной системы;
- интенсивность-расходимость пучка;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 2.1.7.1.** Аксенов В.Л., Балагуров А.М., Козленко Д.П. «Исследования конденсированного состояния вещества на модернизированном реакторе ИБР-2: от функциональных материалов до нанобиотехнологий» // Физика ЭЧАЯ. 2016. Т. 47. № 4.С. 1153-1191.
- 2.1.7.2.** В.Л. Аксенов, А.М. Балагуров “Дифракция нейтронов на импульсных источниках” УФН, 186 (2016) 293-320.
- 2.1.7.3.** Lis O.N., Kichanov S.E., Kozlenko D.P., et al. "Pressure-induced spin state crossover in layered cobaltite LaSrCoO4", Journal of Magnetism and Magnetic Materials. V. 487. P. 165360 (2019)

2.1.7.4. S. Mühlbauer, P.G. Niklowitz, M. Stadlbauer, et. al., «Elliptic neutron guides—focusing on tiny samples», NIM A, V 586, Issue 1, pp. 77-80

2.1.7.5. A.C. Komarek, P. Böni, M. Braden, «Parabolic versus elliptic focusing – Optimization of the focusing design of a cold triple-axis neutron spectrometer by Monte-Carlo simulations», NIM A, V 647, Issue 1, 2011, pp. 63-72

2.1.7.6. В. И. Боднарчук, В. В. Садилов, «О влиянии фона запаздывающих нейтронов на экспериментальные возможности установок на импульсных нейтронных источниках с модуляцией реактивности», Письма в ЭЧАЯ. 2022. Т. 19, № 2(241). С. 100–109

2.1.7.7. Механический фильтр нейтронного пучка с временной фокусировкой. Патент на изобретение №2745587

2.1.7.8. G Zsigmond, K Lieutenant, S Manoshin, et al., «A survey of simulations of complex neutronic systems by VITESS», NIM A, V 529, Issues 1–3, 2004, pp. 218-222

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Отчет о результатах проведенного моделирования конфигурации нейтронной системы дифрактометра. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.7_Отчет о результатах проведенного моделирования конфигурации нейтронной системы дифрактометра.pdf](#)

2.1.8 Синтез, структурная и магнитная характеристика тонких пленок и планарных наноструктур на основе бора. (Совместно с ИФМ УО РАН)

Задачами второго этапа выполнения проекта ставилось методом высоковакуумного магнетронного распыления синтезировать высококачественные сверхтонкие пленки и планарные наноструктуры на основе бора. Рентгеноструктурные исследования, проведенные с использованием методов рентгеновской рефлектометрии и дифрактометрии высокого разрешения, должны выявить качество полученных образцов: выдержанная периодичность слоистой структуры, резкие межслойные границы. Магнитометрические исследования, проведенные с помощью вибрационной магнитометрии, должны дать информацию об особенностях магнитного поведения, которые могут быть связаны с формированием межслойного обменного упорядочения в наноструктурах

Многослойные наноструктуры являются искусственным, синтезируемым материалом, и поэтому тщательная отработка методики приготовления экспериментальных образцов является необходимым условием для проведения дальнейших исследований физических свойств. Особенность изготовления наноструктур состоит в том, что характеристики материала задаются не только структурной формулой, но также определяются технологическими особенностями используемой напылительной системы. Однако, количественные значения характеристик образца могут быть существенно улучшены выбором оптимальных именно для данной напылительной системы условий приготовления (давления рабочего газа, температуры и шероховатости подложки, мощности магнетронного разряда, режима ионной очистки поверхности, предваряющей процесс напыления и т. д.). Для дальнейшей оптимизации характеристик слоистых наноструктур необходимо проанализировать зависимости от толщины слоев для того, чтобы выбрать определенное сочетание толщин магнитных и немагнитных слоев и оптимальные для данной напылительной системы режимы приготовления наноструктуры. В результате исследования различных режимов напыления были выбраны следующие условия изготовления образцов: продолжительность ионной очистки поверхности подложки перед напылением – 10 мин. при мощности магнетрона переменного тока – 100 W; мощность магнетронов постоянного тока при напылении – 100 W; рабочее давление аргона – 0.1 Па при скорости натекания 22 мл/мин.; температура подложки – (298-300) K; частота вращения подложки – 10 об./мин.

Номинальные толщины определялись путем калибровки скорости напыления с помощью оптического профилометра-интерферометра белого света Zygo NewView 7300. После изготовления образцов толщины были уточнены при помощи рентгеновских методов.

Серия сверхрешеток: $\text{Nb}(100 \text{ \AA}) / [\text{CoFeB}(50 \text{ \AA}) / \text{Nb}(t \text{ \AA})]_{*20} / \text{Nb}(50 \text{ \AA})$, $t = 8 - 20 \text{ \AA}$ (Таблица 2.1.8.1) была выращена на подложках Al_2O_3 с кристаллической ориентацией (10-12). Буферный слой Nb был напылен для “сглаживания” разницы в постоянных решетках между подложкой и основной пленкой. Данный слой оказался достаточным как для релаксации напряжений, вызванных различием в постоянных решетках, так и для сглаживания шероховатости подложки, которая, согласно данным производителя, составляла несколько ангстрем. Образцы пронумерованы и расположены в Таблице 2.1.8.1 в порядке уменьшения толщины слоев Nb.

№ п/п	Структурная формула
1	$\text{Al}_2\text{O}_3 // \text{Nb}(100 \text{ \AA}) / \text{CoFeB}(1000 \text{ \AA}) / \text{Nb}(50 \text{ \AA})$
2	$\text{Al}_2\text{O}_3 // \text{Nb}(100 \text{ \AA}) / [\text{CoFeB}(50 \text{ \AA}) / \text{Nb}(20 \text{ \AA})]_{*20} / \text{Nb}(50 \text{ \AA})$
3	$\text{Al}_2\text{O}_3 // \text{Nb}(100 \text{ \AA}) / [\text{CoFeB}(50 \text{ \AA}) / \text{Nb}(16 \text{ \AA})]_{*20} / \text{Nb}(50 \text{ \AA})$
4	$\text{Al}_2\text{O}_3 // \text{Nb}(100 \text{ \AA}) / [\text{CoFeB}(50 \text{ \AA}) / \text{Nb}(12 \text{ \AA})]_{*20} / \text{Nb}(50 \text{ \AA})$
5	$\text{Al}_2\text{O}_3 // \text{Nb}(100 \text{ \AA}) / [\text{CoFeB}(50 \text{ \AA}) / \text{Nb}(8 \text{ \AA})]_{*20} / \text{Nb}(50 \text{ \AA})$

Таблица 2.1.8.1 Список тонких пленок и планарных наноструктур на основе гадолиния, синтезированных за время выполнения проекта. В приведенных формулах указаны номинальные толщины слоев.

Магнитные измерения проводились при комнатной температуре на лабораторном вибрационном магнитометре АВМ-1. На Рисунках 2.1.8.1 а) – г) представлены зависимости намагниченности от индукции приложенного магнитного поля.

Из анализа петель гистерезиса, измеренных при комнатной температуре, следует, что намагниченность насыщения образцов #4 и #5 с толщиной слоя Nb 8 Å и 12 Å примерно соответствует намагниченности объемного CoFeB. Поле коэрцитивности для этих образцов очень мало, примерно, 8 Э. Поля насыщения также небольшие – около 20 Э. Таким образом, эти образцы представляют собой магнитомягкие системы с межслойным магнитным упорядочением близким к ферромагнитному.

Дальнейшее увеличение толщины слоев Nb кардинально меняет магнитное поведение наноструктур. Остаточная намагниченность очень мала – около 50 Гс, коэрцитивность резко возрастает до 50 Э при толщине Nb 16 Å и 125 “ при толщине 20 Å. Насыщение не достигается даже в магнитных полях 3 кЭ, поведение намагниченности характерно для случая намагничивания вдоль трудной оси. Можно сделать вывод, что в этих образцах появляется перпендикулярная магнитная анизотропия, которая возрастает по мере увеличения толщины слоев Nb.

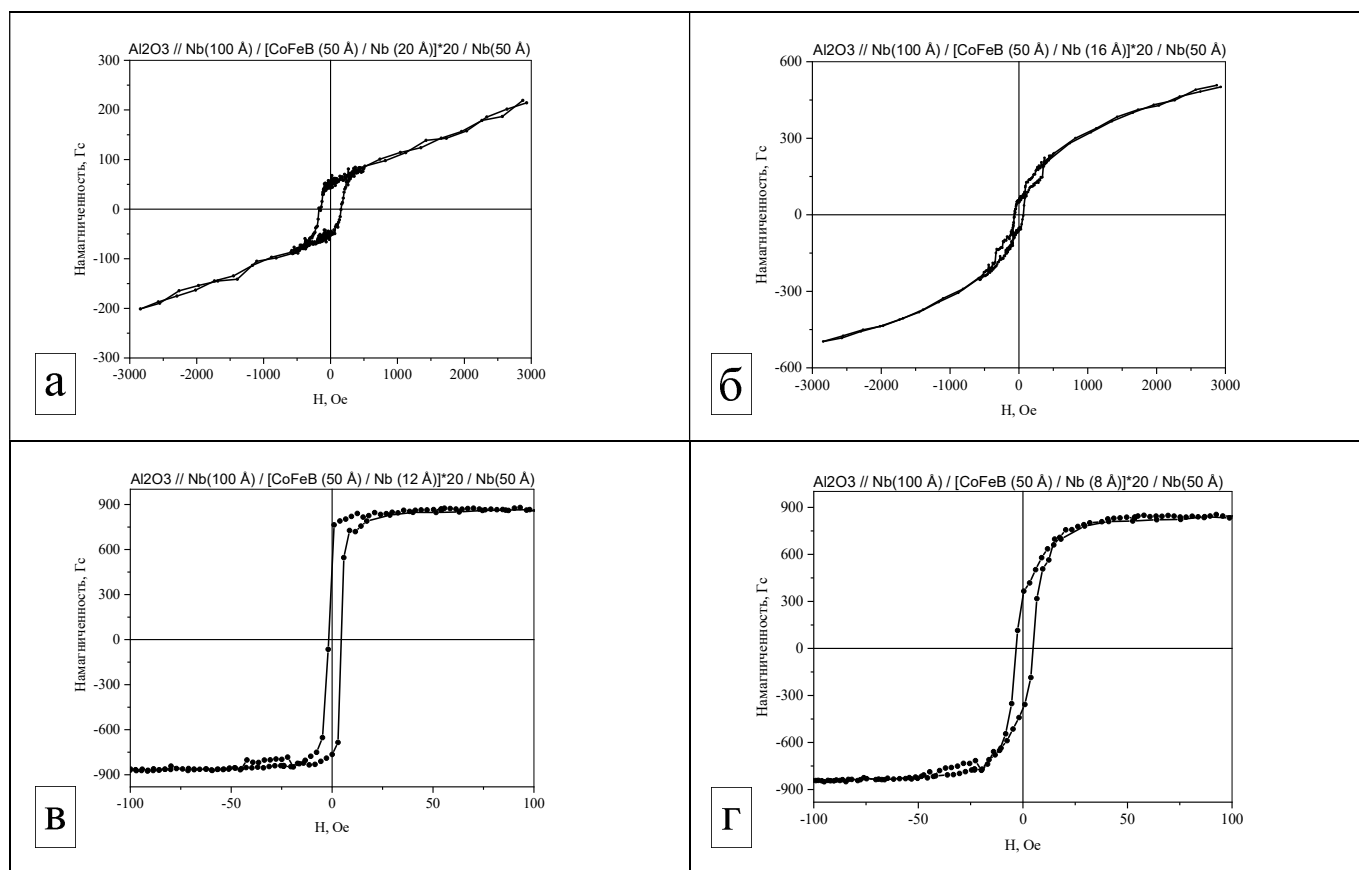


Рисунок 2.1.8.1. Зависимости намагниченности от индукции приложенного магнитного поля: а) петля гистерезиса для образца №2, измеренная при $T=300 \text{ K}$; б) петля гистерезиса для образца №3, измеренная при $T=300 \text{ K}$; в) петля гистерезиса для образца №4, измеренная при $T=300 \text{ K}$; г) петля гистерезиса для образца №5, измеренная при $T=300 \text{ K}$.

Таким образом, синтезированные образцы представляют из себя набор магнитных систем, характеризующихся либо отсутствием магнитокристаллической анизотропии при малых толщинах слоев Nb, либо сильной перпендикулярной магнитной анизотропией при толщинах слоев Nb 16 и 20 Å.

Рентгеноструктурный анализ проводился с использованием лабораторного дифрактометра Panalytical Empyrean Series 2. Эксперименты проводились в излучении от кобальтовой рентгеновской трубки. Для формирования параллельного пучка на первичном пучке использовался гибридный монохроматор, состоящий из параболического зеркала на основе сверхрешетки W/Si и двухкристального (220)Ge монохроматора. Высота пучка, ограниченного щелью, составляла 0.08 мм. На вторичном пучке использовался плоскопараллельный коллиматор с плоским графитовым монохроматором и коллимирующей щелью с экваториальной апертурой 0.1 мм.

Измерения, выполненные в режиме большеугловой рентгеновской дифракции, показали отсутствие структурных брегговских рефлексов от CoFeB, системы являются ренгеноаморфными. Качество межслойных границ приготовленных наноструктур оценивалось при помощи рентгеновской рефлектометрии. На Рисунке 2.1.8.2 представлены экспериментальные рефлектометрические кривые для образцов № 2- № 5. Рефлектограммы были обработана в коммерческой программе X-Pert Reflectivity, которая была предоставлена фирмой-производителем прибора.

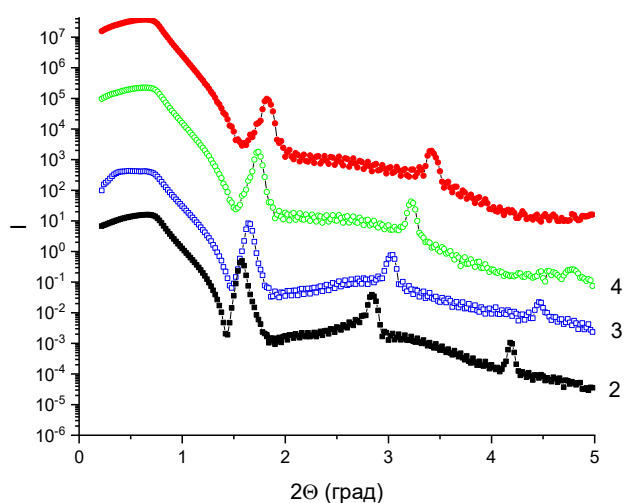


Рисунок 2.1.8.2. Экспериментальные рефлектометрические кривые для образцов №2 - №5.

Наличие выраженных сверхрешеточных рефлексов и кессиговских осцилляций свидетельствует о хорошо определенной слоистой структуре и малой шероховатости интерфейсов слоистой структуры. Таким образом, согласно структурной аттестации, образцы имеют слоистую структуру со строго определённой периодичностью, резкие межслойные границы со среднеквадратичной амплитудой шероховатостей $\sigma = 4 - 9$ Å.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт синтеза образцов CoFeB №4 от 05.07.2022г. ФАЙЛ: [Прил. ПГ_2.1.8_Акт синтеза образцов CoFeB №4 от 05.07.2022г.pdf](#)
- Научный отчет (Синтез, структурная и магнитная характеристика тонких пленок и планарных наноструктур на основе дора В₄С). ФАЙЛ: [Прил. ПГ_2.1.8_Научный отчет \(Синтез, структурная и магнитная характеристика тонких пленок и планарных наноструктур на основе дора В₄С\).pdf](#)

2.1.9 Синтез, структурная и магнитная характеристика планарных наноструктур на основе гадолиния, нейтронные рефлектометрические исследования отражения, прохождения нейтронов и генерации вторичного излучения от таких наноструктур. (Совместно с ИФМ УО РАН)

Объектом исследования являются сверхтонкие пленки и планарные наноструктуры на основе гадолиния. Конкретными задачами исследования ставилось синтез, структурная и магнитная характеристика

планарных наноструктур на основе гадолиния, нейтронные рефлектометрические исследования отражения, прохождения нейтронов и генерации вторичного излучения от таких наноструктур

Задачи второго этапа проекта полностью выполнены. Методом высоковакуумного магнетронного распыления синтезированы высококачественные сверхтонкие пленки и планарные наноструктуры на основе Gd. Рентгеноструктурные исследования, проведенные с использованием методов рентгеновской рефлектометрии и дифрактометрии высокого разрешения, подтвердили высокое качество полученных образцов: строго выдержанная периодичность слоистой структуры, резкие межслойные границы. Магнитометрические исследования, проведенные с помощью SQUID магнитометрии, обнаружили особенности магнитного поведения, которые могут быть связаны с формированием межслойного обменного упорядочения в наноструктурах.

Были проведены экспериментальные нейтронные рефлектометрические исследования отражения и прохождения нейтронов в наноструктурах. Было обнаружено неоднородное распределение намагниченности в слоях Gd, а именно образование индуцированного магнитного момента вблизи интерфейсной области, толщиной в 10 \AA .

Экспериментально показана возможность генерации вторичного излучения и получения гамма-сигнала в режиме усиленных стоячих волн от гетероструктуры с массой гадолиния в 2 микрограмма. Показано, что, используя текущие параметры количество детектируемого гадолиния может быть всего 40 нанограмм, а при использовании обогащенного изотопа ^{157}Gd детектируемая масса может быть уменьшена до единиц нанограмм.

Сверхрешётки являются искусственным, синтезируемым материалом, и поэтому тщательная отработка методики приготовления экспериментальных образцов является необходимым условием для проведения дальнейших исследований физических свойств. Особенность изготовления наноструктур состоит в том, что характеристики материала задаются не только структурной формулой, но также определяются технологическими особенностями используемой напылительной системы. Однако, количественные значения характеристик образца могут быть существенно улучшены выбором оптимальных именно для данной напылительной системы условий приготовления (давления рабочего газа, температуры и шероховатости подложки, мощности магнетронного разряда, режима ионной очистки поверхности, предваряющей процесс напыления и т. д.). Для дальнейшей оптимизации характеристик сверхрешётки необходимо проанализировать зависимости от толщины слоев для того, чтобы выбрать определенное сочетание толщин магнитных и немагнитных слоев и оптимальные для данной напылительной системы режимы приготовления наноструктуры. В результате исследования различных режимов напыления были выбраны следующие условия изготовления образцов: продолжительность ионной очистки поверхности подложки перед напылением – 10 мин. при мощности магнетрона переменного тока – 100 W; мощность магнетронов постоянного тока при напылении – 100 W; рабочее давление аргона – 0.1 Па при скорости натекания 22 мл/мин.; температура подложки – (298-300) K; частота вращения подложки – 10 об./мин. Номинальные толщины определялись путем калибровки скорости напыления с помощью оптического профилометра-интерферометра белого света Zygo NewView 7300. После изготовления образцов толщины были уточнены при помощи рентгеновских методов.

Серия сверхрешёток $\text{Cr}(50 \text{ \AA})/[\text{Fe}(35 \text{ \AA})/\text{Cr}(t, \text{ \AA})/\text{Gd}(50 \text{ \AA})/\text{Cr}(t, \text{ \AA})]_{12}/\text{Cr}(30 \text{ \AA})$, $t = 0 - 60 \text{ \AA}$ и наноструктура Nb/Gd/Nb (Таблица 2.1.9.1) была выращена на подложках Al_2O_3 . Буферный слой Cr был напылен для “сглаживания” разницы в постоянных решетках между подложкой и основной пленкой Fe/Cr/Gd. Данный слой оказался достаточным как для релаксации напряжений, вызванных различием в постоянных решетки, так и для сглаживания шероховатости подложки, которая, согласно данным производителя, составляла несколько ангстрем.

№	Формулы образцов
1	Al ₂ O ₃ / Nb(250 Å /Gd(10 Å)/Nb(250 Å)/ TaCu(50 Å)
2	Al ₂ O ₃ /Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr(5.8 Å)/Gd(50 Å)/Cr(5.8 Å)] ₁₂ /Cr(30 Å)
3	Al ₂ O ₃ /Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr 7.2 Å)/Gd(50 Å)/Cr(7.2 Å)] ₁₂ /Cr(30 Å)
4	Al ₂ O ₃ /Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr(10 Å)/Gd(50 Å)/Cr(10 Å)] ₁₂ /Cr(30 Å)
5	Al ₂ O ₃ /Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr(20 Å)/Gd(50 Å)/Cr(20 Å)] ₁₂ /Cr(30 Å)
6	Al ₂ O ₃ /Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr(60 Å)/Gd(50 Å)/Cr(60 Å)] ₁₂ /Cr(30 Å)
7	Al ₂ O ₃ /Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr(8.6 Å)/Gd(50 Å)/Cr(8.6 Å)] ₁₂ /Cr(30 Å)

Таблица 2.1.9.1. Список тонких пленок и планарных наноструктур на основе гадолиния, синтезированных за время выполнения проекта.

Рентгеноструктурный анализ проводился с использованием лабораторного дифрактометра Panalytical Empyrean Series 2. Эксперименты проводились в излучении от медной и хромовой рентгеновских трубок. Для формирования параллельного пучка на первичном пучке использовался гибридный монохроматор, состоящий из параболического зеркала на основе сверхрешетки W/Si и двухкристального (220)Ge монохроматора. Высота пучка, ограниченного щелью, составляла 0.08 мм. На вторичном пучке использовался плоскопараллельный коллиматор с плоским графитовым монохроматором и коллимирующей щелью с экваториальной апертурой 0.1 мм.

Качество межслойных границ, приготовленных наноструктур оценивалось при помощи рентгеновской рефлектометрии. На Рисунке 2.1.9.1 представлена типичная дифрактограмма для одного из образцов (образец № 6). Все рефлектограммы были обработаны в коммерческой программе X-Pert Reflectivity, которая была предоставлена фирмой-производителем прибора. Наличие выраженных кессиговских осцилляций свидетельствует о малой шероховатости интерфейсов слоистой структуры. При обработке предполагалось, что верхний слой Cr после извлечения образца из ростовой камеры на воздух до постановки его в дифрактометр, частично окисляется, образуя оксидную пленку Cr₂O₃, толщина которой составляет от 10 до 19 Å. Согласно результатам обработки, среднеквадратичная шероховатость подложки составляет 5 - 10 Å. Характеристики интерфейсов Fe/Cr, Cr/Fe и Gd/Cr, Cr/Gd отличаются, причем во всех случаях межслойные шероховатости на границе Cr/Fe и Cr/Gd больше, т.е. $\sigma(\text{Cr/Fe}) > \sigma(\text{Fe/Cr})$ и $\sigma(\text{Cr/Gd}) > \sigma(\text{Gd/Cr})$. Возможно, шероховатость межслойных границ Cr/Fe и Cr/Gd обусловлена несовершенством поверхности слоя Cr. Скорее всего, после формирования на поверхности слоя Fe (Gd) первого слоя Cr последующий рост Cr происходит в виде островков, и как следствие этого, возможны значительные флуктуации толщин слоев Cr. Самое больше значение среднеквадратичной шероховатости на образовавшемся оксиде хрома 7.4 - 16.2 Å. Так как межслойная шероховатость на границах Fe/Cr, Cr/Fe и Gd/Cr, Cr/Gd составляет 3.1 – 6.7 Å, то можно предположить, что слой хрома неоднороден, и возможны прорастания через прослойку, т.е. Fe и Gd имеет прямое обменное взаимодействие.

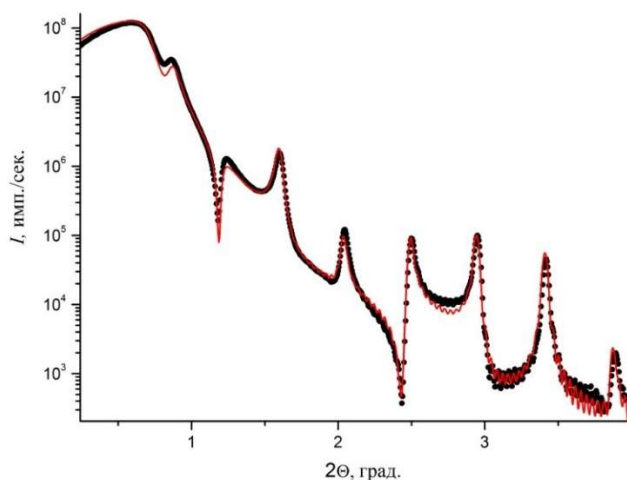


Рисунок 2.1.9.1. Экспериментальные данные (символы) и результат обработки (линия) рентгеновской рефлектометрии для сверхрешетки Fe/Cr(60 Å)/Gd (образец № 6).

Таким образом, согласно структурной аттестации, образцы имеют слоистую структуру со строго определённой периодичностью, резкие межслойные границы со среднеквадратичной амплитудой шероховатостей $\sigma = 4 - 9 \text{ \AA}$. Наибольшее значение σ соответствует границам раздела из слоя хрома в слой железа и гадолиния по сравнению с границами раздела из слоёв железа и гадолиния в слой хрома.

Низкотемпературные магнитные измерения проводились на СКВИД – магнетометре в магнитном поле 500 Э. Образцы (с прослойкой хрома $t_{\text{Cr}} = 15 - 60 \text{ \AA}$) характеризуются монотонно убывающей температурной зависимостью намагниченности. На Рисунке 2.1.9.2 представлены температурные зависимости намагниченности для образцов № 5 и 6.

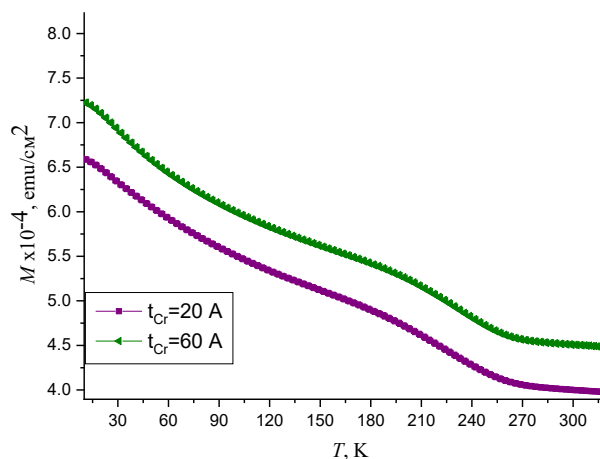


Рисунок 2.1.9.2. Зависимости намагниченности от температуры для образцов № 5 – 6: Fe/Cr(20 Å)/Gd, Fe/Cr(60 Å)/Gd, измеренные при H=500 Э.

Для всех образцов выше температуры 250 К величина намагниченности выходит на постоянное значение, что очевидно связано с переходом основного объема слоев Gd в парамагнитную фазу. При этом величина остаточной намагниченности обусловлена магнитным моментом слоев Fe. Для образцов при $t_{\text{Cr}} > 8.6$ величина намагниченности с ростом температуры монотонно убывает, что свидетельствует об уменьшении намагниченности в слоях Gd. Намагниченность слоёв Gd и Fe при этом ориентированы по направлению внешнего магнитного поля. Такое поведение свидетельствует о малости (или отсутствии) межслойного обменного взаимодействия и, как следствие, о ферромагнитном упорядочении магнитных моментов слоев Fe и Gd в приложенном магнитном поле. Величина намагниченности слабо меняется с увеличением толщины прослойки.

Для исследования распределения магнитных моментов Fe и Gd в сверхрешетках Fe/Cr/Gd с разрешением по глубине использовали рефлектометрию поляризованных нейтронов (РПН). Большинство нейтронных измерений были проведены на рефлектометре NREX на стационарном нейтронном реакторе FRM-II (г. Гархинг, Германия). Отдельные измерения проводились также на времяпролетном рефлектометре РЕМУР (ИБР-2, ОИЯИ, г. Дубна) и рефлектометре SuperADAM института Лауэ - Ланжевена (г. Гренобль, Франция). В нейтронной рефлектометрии при полном поляризационном анализе измерялись четыре коэффициента отражения нейтронов в зависимости от переданного импульса: две зависимости без переверота спина (R^{++} и R^{--}) и две с переверотом спина (R^{+-} и R^{-+}).

На Рисунках 2.1.9.3 а) и б) приведена зависимость коэффициента отражения нейтронов, поляризованных в направлении магнитного поля (R^{++}) и против направлению магнитного поля (R^{--}), от переданного импульса для структур Fe/Cr(5.8 Å)/Gd и Fe/Cr(7.2 Å)/Gd при значении напряженности магнитного поля $H = 500 \text{ Э}$ и температуре 15 К. Можно отметить на кривых хорошо прорисованные кессиговские осцилляции между брэгговскими пиками, что еще раз говорит о высоком качестве образцов.

Отличительной особенностью рефлектометрической кривой для сверхрешетки Fe/Cr(5.8 Å)/Gd является наличие спин-флип сигнала R^{+-} . Это означает, что магнитный момент в слое Gd повернут под каким-то углом относительно направления внешнего магнитного поля. Согласно расчету, магнитные моменты Gd в интерфейсных областях при $T=15 \text{ К}$ равны $M_{\text{H}} = 4.9 \mu_{\text{B}}/\text{атом}$ и $M_{\text{B}} = 6 \mu_{\text{B}}/\text{атом}$, в центральной части $M_0 = 3 \mu_{\text{B}}/\text{атом}$. Магнитный момент в слое Fe во всем диапазоне температур равен $2.1 \mu_{\text{B}}/\text{атом}$ и ориентирован по

направлению внешнего магнитного поля. Угол поворота магнитного момента Gd в интерфейсных подслоях равен 50° , в центральном подслое $\sim 132^\circ$.

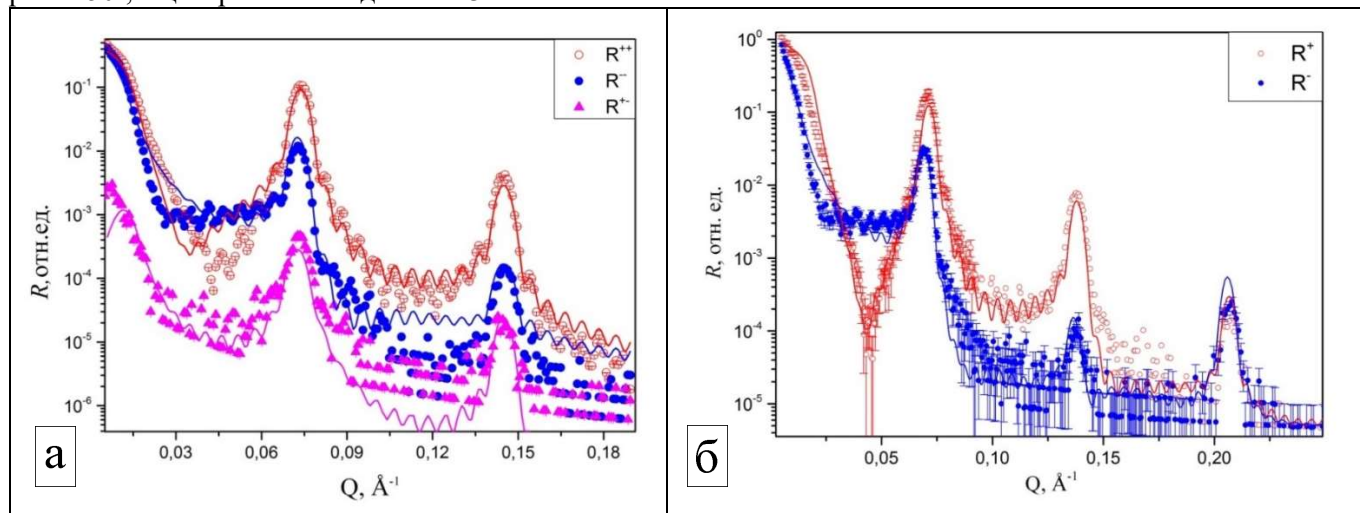


Рисунок 2.1.9.3. Результаты нейтронной рефлектометрии: а) зависимость коэффициента отражения нейтронов, поляризованных в направлении магнитного поля (R^{++}), противоположно направлению магнитного поля (R^{-}) и со спин-флипом (R^{+-}) от переданного импульса для структуры Fe/Cr(5.8 Å)/Gd при значении напряженности магнитного поля $H = 500$ Э и температуре 15 К (экспериментальные значения – символы, расчетные значения – линия); б) зависимость коэффициента отражения нейтронов, поляризованных в направлении магнитного поля (R^{+}) и противоположно направлению магнитного поля (R^{-}), от переданного импульса для структуры Fe/Cr(7.2 Å)/Gd при значении напряженности магнитного поля $H = 500$ Э и температуре 15 К (экспериментальные значения – символы, расчетные значения – линия).

Для гетероструктуры Fe/Cr(7.2 Å)/Gd была определена зависимость относительной величины магнитного момента слоев Fe, Cr и Gd от толщины слоёв образца описываемая формулой (2.1.9.1). Для описания распределения магнитного момента внутри слоев Gd, нами использовалась следующая параметризация

$$M(z) = M_0 + \frac{\sinh[(t-2z)/2\tau]}{\sinh[t/2\tau]} \times [(M_B - M_0)\eta(t - 2z) + (M_H - M_0)\eta(2z - t)] \quad (2.1.9.1)$$

где $\eta(x)$ – функция Хевисайда; t – толщина слоя; M_0 , M_B , M_H – значения магнитного момента в центральном, верхнем и нижнем подслоях. Параметр τ описывает скорость изменения величины магнитного момента с глубиной внутри слоя. Данная зависимость приведена на Рисунке 2.1.9.4.

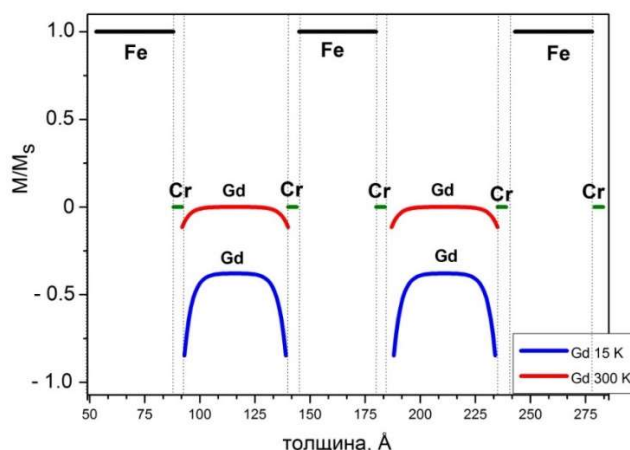


Рисунок 2.1.9.4. Зависимость относительной величины среднего магнитного момента Fe, Cr и Gd в сверхрешетке Fe/Cr(7.2 Å)/Gd от толщины слоёв в магнитном поле $H=500$ Э при $T=15$ и 300 К.

Для исследования зависимости магнитного момента от приложенного магнитного поля, измерения были проведены еще в полях 30 Э, 1 кЭ, 2 кЭ, 3кЭ, 4 кЭ и 4.6 кЭ. Во внешнем магнитном поле 1кЭ и 4 кЭ (Рисунок 2.1.9.5) магнитные моменты Gd достигают максимального значения 6 μ_B в интерфейсных областях,

и магнитные моменты развернуты так, что угол между магнитным полем и моментом составляет 15 - 20 градусов. Магнитный момент Fe равен 2.1 μ_B /атом. Все расчетные значения углов и магнитных моментов приведены в таблице 2.1.9.2.

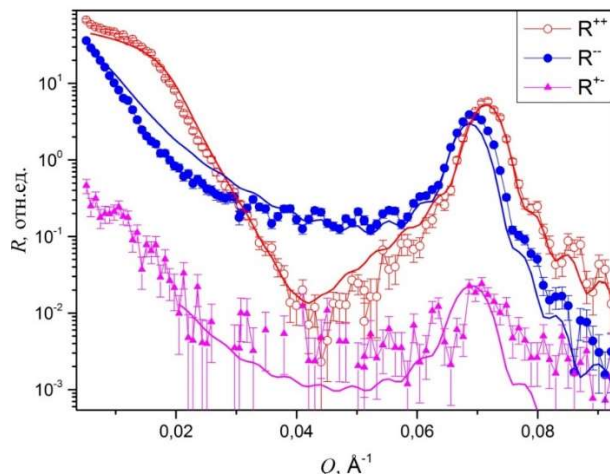


Рисунок 2.1.9.5. Зависимость коэффициента отражения нейтронов, поляризованных в направлении магнитного поля (R^{++}) и противоположно направлению магнитного поля (R^-) и со спин-флипом (R^+) от переданного импульса для структуры Fe/Cr(7.2 Å)/Gd при температуре 15 К и $H=4$ кЭ.

Были измерены коэффициенты отражения нейтронов, поляризованных в направлении магнитного поля (R^{++}), против магнитного поля (R^-) во внешних магнитных полях 30 Э, 1 кЭ, 2 кЭ, 3кЭ, 4 кЭ при $T=15$ К. На Рисунке 2.1.9.6 а) представлена зависимость отношения интегральных значений коэффициентов отражения нейтронов R^{++}/R^- от внешнего магнитного поля. Из приведенных данных видно, что с увеличением магнитного поля разница по высоте между пиками R^{++} и R^- уменьшается, что говорит об увеличении среднего магнитного момента гадолиния. Из этого следует, что величины внешнего магнитного поля 1 кЭ достаточно, чтобы развернуть магнитные моменты слоев Gd по направлению внешнего магнитного поля в системе Fe/Cr/Gd. И при толщине прослойки Cr 7.2 Å наблюдается максимальная намагниченность в системе Fe/Cr/Gd.

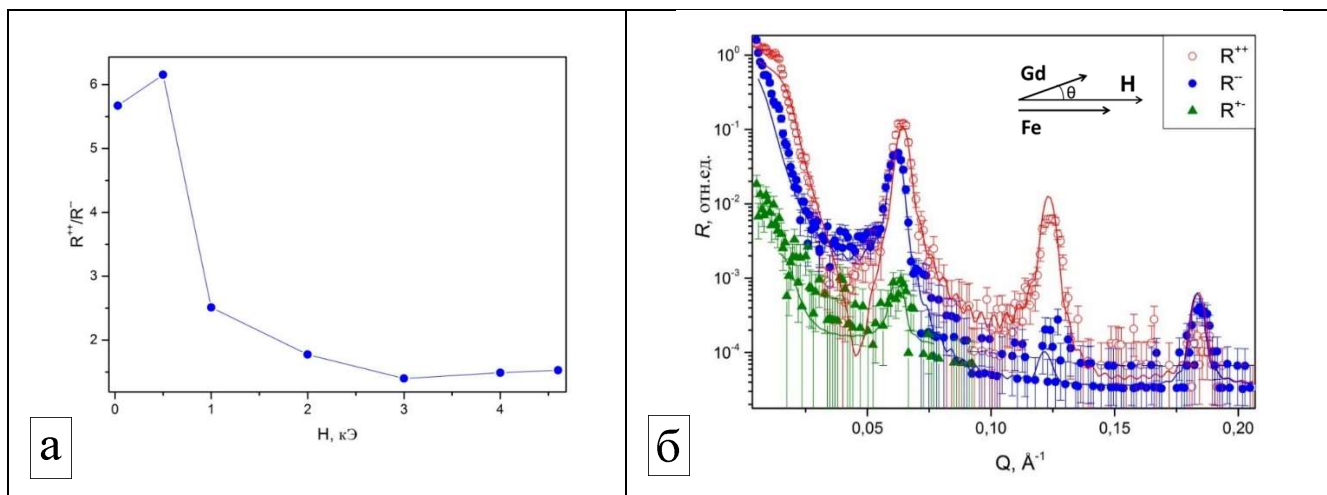


Рисунок 2.1.9.6. а) зависимость отношения интегральных значений коэффициентов отражения R^{++}/R^- первых брэгговских пиков от внешнего магнитного поля для структуры Fe/Cr(7.2 Å)/Gd при температуре 15К; б) зависимость коэффициента отражения нейтронов, поляризованных в направлении магнитного поля (R^{++}) и противоположно направлению магнитного поля (R^-), со спин-флипом (R^+) от переданного импульса для структуры Fe/Cr(10 Å)/Gd при температуре 15 К и $H=500$ Э.

В образце с прослойкой хрома 10 Å (Рисунок 2.1.9.6 б) при низкой температуре наблюдается небольшой спин-флип сигнал. Это говорит о том, что средние магнитные моменты слоев Gd и Fe повернуты

относительно направления магнитного поля на небольшой угол, т.е. формируется скошенное состояние. Расчеты показали, что угол между внешним магнитным полем и магнитным моментом Gd равен 20°. В слое Fe магнитные моменты направлены строго по полю. На вставке рисунка 2.1.9.6 б) схематично изображено направление магнитных моментов слоев Fe и Gd относительно магнитного поля.

образец	температура, К	внешнее магнитное поле, кЭ	среднее значение магнитного момента подслоев Gd в расчете на атом, μв/атом			угол между направлением среднего магнитного момента подслоев и магнитным полем, градусы		
			M _в	M _о	M _н	θ _в	θ _о	θ _н
Fe/Cr(5.8)/Gd	15	0.5	4.9	3	6	50	132	50
	15	1	6	4	6	15	15	15
Fe/Cr(7.2)/Gd	15	0.5	5	2	5	180	180	180
	150	0.5	1	0.7	1	180	180	180
	300	0.5	0.5	0	0.3	180	180	180
	15	1	6	2.5	6	20	20	20
	15	4	6	4.5	6	15	15	15
Fe/Cr(10)/Gd	15	0.5	3.3	3	3.3	20	20	20
	300	0.5	1	0	1	0	0	0
Fe/Cr(20)/Gd	15	0.5	1.6	0.4	1.4	0	0	0
	300	0.5	0	0	0	0	0	0

Таблица 2.1.9.2. Среднее значение магнитного момента подслоев Gd и угол между направлением магнитного момента подслоев Gd и внешним магнитным полем для образцов серии сверхрешеток Fe/Cr/Gd.

Из анализа РПН спектров для структур Fe/Cr/Gd с толщиной прослойки Cr больше 8 Å следует, что магнитные моменты внутри слоев Gd распределены неоднородно и среднее значение магнитного момента слоя при низких температурах существенно ниже относительно значений для объемного Gd и Fe/Gd. При толщинах Cr больше 10 Å магнитные моменты Fe и Gd упорядочены ферромагнитно вдоль направления внешнего магнитного поля и значения магнитных моментов меньше, чем в структурах с $t_{Cr} < 8$ Å. При толщине прослойки Cr больше 10 Å при комнатной T=300 К в интерфейсных подслоях слоя Gd магнитный момент равен 0 μв.

На Рисунке 2.1.9.7 приведены зависимости среднего значения магнитного момента в подслое Gd от толщины прослойки Cr при T=15 К и H=500 Э. Из графиков видно, что магнитный момент Gd в интерфейсных подслоях с увеличением толщины Cr уменьшается монотонно (Рисунок 2.1.9.7 а), а в

центральной части (Рисунок 2.1.9.7 б) наблюдается осциллирующая зависимость, это связано с осцилляциями обменного взаимодействия Fe и Gd через прослойку Cr.

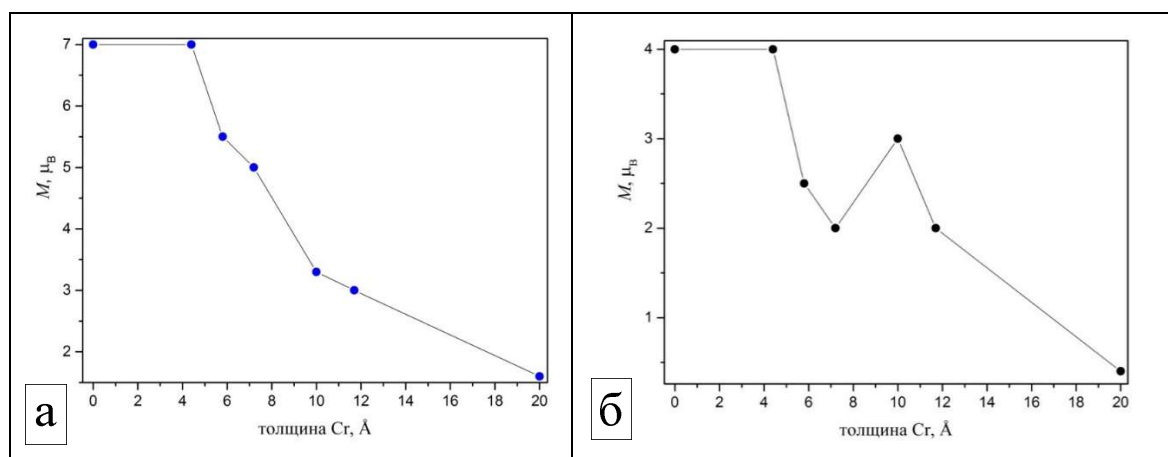


Рисунок 2.1.9.7. а) зависимость среднего значения магнитного момента Gd в интерфейсных подслоях (в расчете на атом) от толщины прослойки Cr при $T=15$ К и $H=500$ Э; б) зависимость среднего значения магнитного момента Gd в центральном подслое (в расчете на атом) от толщины прослойки Cr при $T=15$ К и $H=500$ Э.

Во всех исследованных образцах методами РПН нами было обнаружено неоднородное распределение намагниченности в слоях Gd, а именно образование индуцированного магнитного момента вблизи интерфейсной области, толщиной в 10 \AA . Как было сказано выше, обменное взаимодействие на границе между слоями Fe/Gd имеет большую величину, по сравнению с обменом внутри слоёв Gd. Неоднородное распределение магнитного момента Gd с разрешением по глубине обусловлено обменным взаимодействием Fe и Gd через прослойку Cr. Из нашего исследования и работы следует, что введение прослойки Cr толщиной более 4 \AA между слоями Fe и Gd приводит к существенному уменьшению межслойного обменного взаимодействия. В структурах Fe/Cr/Gd с толщиной прослойки Cr более 10 \AA межслойное обменное взаимодействие отсутствует и наблюдается более однородное распределение магнитного момента слоев Gd, но из-за несовершенства межслойных границ интерфейсные подслои Gd имеют магнитные характеристики, отличающиеся от внутренних областей. Нами установлено уменьшение среднего магнитного момента в слоях Gd относительно значения объёмного Gd методами РПН, что подтверждают также данные СКВИД – магнитометрии (результаты предыдущего года). Уменьшение магнитного момента Gd может быть объяснено разными эффектами: несовершенством межслойных границ, интердиффузией, структурными изменениями в слоях Gd.

Нами была экспериментально проверена возможность детектирования гамма-квантов в нейтронном эксперименте в режиме резонансно-усиленных стоячих волн от пленки гадолиния толщиной в 1 нм , помещенной в резонаторную структуру, состоящую из 50 нм слоя ниобия на сапфировой подложке и покрытой 10 нм пленкой тантал-медного сплава (образец №1). Эксперимент был проведен на времяпролетном рефлектометре РЕМУР импульсного реактора ИБР-2. Недавно рефлектометр прошел модернизация в части возможности измерения гамма-сигнала вместе с измерением интенсивности отраженных нейтронов. Для регистрации гамма-квантов в эксперименте использовался полупроводниковый германиевый детектор, работающий в диапазоне $3 \text{ кэВ} - 10 \text{ МэВ}$. Германиевый кристалл имеет диаметр 61.2 мм и длину 87.3 мм . Для гамма-излучения с энергией 1.33 МэВ эффективность регистрации составляет 45% , а разрешение по энергии 2 кэВ . Гамма-детектор был размещен на расстоянии 3 см от поверхности образца. Размер подложки, использованной в эксперименте составлял $20 \times 15 \text{ мм}^2$, в эксперименте весь образец засвечивался нейтронами. На рис. 2.1.9.8 а) приведены интенсивности зеркального нейтронного отражения (черные точки) и характеристического гамма-излучения с энергией 182 кэВ (красные точки) как функция k_z . Нейтронная кривая характеризуется ПВО с критическим вектором $k_{\text{crit}}=0.09 \text{ нм}^{-1}$, осцилляциями Кизиха выше k_{crit} , а также провалом ниже k_{crit} соответствующему формированию волноводного резонанса при $k_{\text{res}}=0.078 \text{ нм}^{-1}$. При этом в эксперименте наблюдался пик интенсивности гамма-квантов, амплитуда которого превышала типичную интенсивность гамма-лучей при $k_z > k_{\text{crit}}$ примерно на порядок.

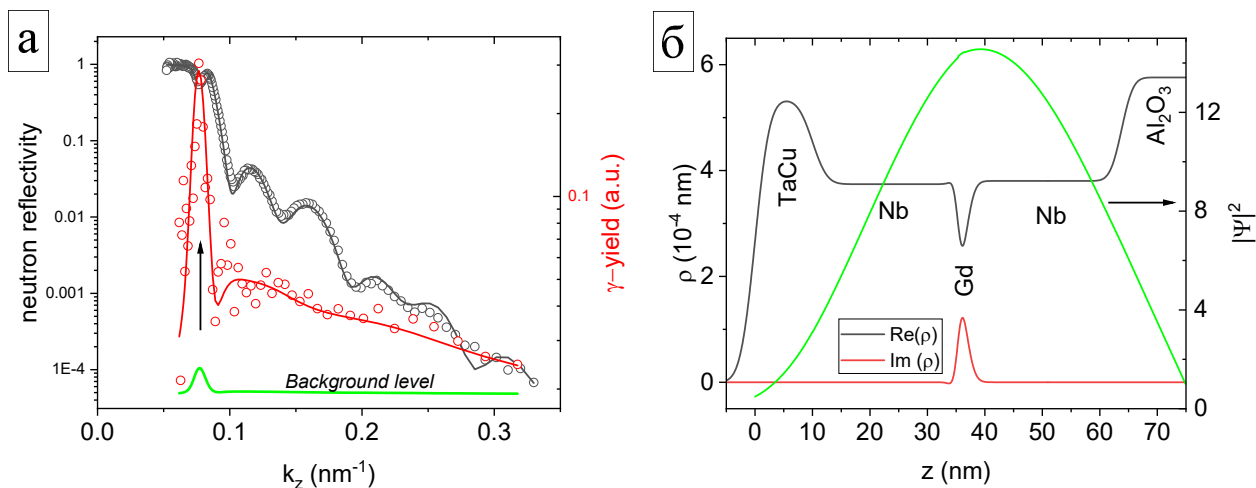


Рисунок 2.1.9.8. а) экспериментальные данные (точки) и расчет (сплошные линии) коэффициента нейтронного отражения и гамма-рассеяния для образца №1. Положение волноводного резонанса показано вертикальной стрелкой; б) реальная и мнимая часть ПДР полученная в результате фита. ПДР для гадолиния рассчитывался для длины волны $\lambda=4.1\text{\AA}$, соответствующей положению оптического резонанса. Зеленой линией показан профиль плотности нейтронов $|\Psi(z)|^2$ в резонансе.

Совместный анализ нейтронных и гамма данных проводился в программном пакете ESCAPE. Для фиттирования нейтронных данных варьировались толщины слоев и их ПДР, а также среднеквадратичные высоты шероховатостей на границах раздела различных слоев. Для полученных данных рассчитывалась волновая нейтронов и с ее помощью функция выхода гамма лучей. Дополнительными параметрами при фите гамма-интенсивности были скалирующий параметр s и фоновая интенсивность I_{bg} . Помимо этого, нейтронные и рентгеновские кривые были свернуты с функцией разрешения спектрометра, учитывающими расходимость падающего нейтронного пучка и разрешение по длине волны нейтрона. Особенностью обработки данных времяпролетного эксперимента являлся тот факт, что длина рассеяния гадолиния зависела от длины волны, что было учтено при обработке. Результаты подгонки представлены сплошными линиями на рис. 2.1.9.8 а. Соответствующий профиль ПДР и рассчитанная для него плотность нейтронов в резонансе представлена на рис 2.1.9.8 б). Как видно из рис. 2.1.9.8 а) модель очень хорошо согласуется с экспериментом.

Объектом исследования являются сверхтонкие пленки и планарные наноструктуры на основе гадолиния. Конкретными задачами исследования ставилось синтез, структурная и магнитная характеристика планарных наноструктур на основе гадолиния, нейтронные рефлектометрические исследования отражения, прохождения нейтронов и генерации вторичного излучения от таких наноструктур.

Задачи второго этапа проекта полностью выполнены. Методом высоковакуумного магнетронного распыления синтезированы высококачественные сверхтонкие пленки и планарные наноструктуры на основе Gd. Рентгеноструктурные исследования, проведенные с использованием методов рентгеновской рефлектометрии и дифрактометрии высокого разрешения, подтвердили высокое качество полученных образцов: строго выдержанная периодичность слоистой структуры, резкие межслойные границы. Магнитометрические исследования, проведенные с помощью SQUID магнитометрии, обнаружили особенности магнитного поведения, которые могут быть связаны с формированием межслойного обменного упорядочения в наноструктурах.

Были проведены экспериментальные нейтронные рефлектометрические исследования отражения и прохождения нейтронов в наноструктурах. Было обнаружено неоднородное распределение намагниченности в слоях Gd, а именно образование индуцированного магнитного момента вблизи интерфейсной области, толщиной в 10 Å. Неоднородное распределение магнитного момента Gd с разрешением по глубине обусловлено обменным взаимодействием Fe и Gd через прослойку Cr. Из нашего исследования и работы следует, что введение прослойки Cr толщиной более 4 Å между слоями Fe и Gd приводит к существенному уменьшению межслойного обменного взаимодействия. В структурах Fe/Cr/Gd с толщиной прослойки Cr более 10 Å межслойное обменное взаимодействие отсутствует и наблюдается более однородное распределение магнитного момента слоев Gd, но из-за несовершенства межслойных границ интерфейсные подслои Gd имеют магнитные характеристики, отличающиеся от внутренних областей. Нами установлено уменьшение среднего магнитного момента в слоях Gd относительно значения объемного Gd методами РПН, что подтверждают также данные СКВИД – магнитометрии (результаты предыдущего года).

Экспериментально показана возможность генерации вторичного излучения и получения гамма-сигнала в режиме усиленных стоячих волн от гетероструктуры с массой гадолиния в 2 микрограмма.

Показано, что, используя текущие параметры количество детектируемого гадолиния может быть всего 40 нанограмм, а при использовании обогащенного изотопа ^{157}Gd детектируемая масса может быть уменьшена до единиц нанограмм.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт синтеза образцов Gd №3 от 05.07.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.9_Акт синтеза образцов Gd №3 от 05.07.2022г.pdf](#)
- Научный отчет (Синтез, структурная и магнитная характеристика планарных наноструктур на основе Gd). ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.9_Научный отчет \(Синтез, структурная и магнитная характеристика планарных наноструктур на основе Gd\).pdf](#)

2.1.10 Разработка эскизной конструкторской документации на двумерную позиционно-чувствительную многопроволочную камеру апертурой не менее 200x200 мм² с пространственным разрешением не менее 2x2 мм² с поканальной регистрацией сигнала. (Совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ)

В ходе работ по проекту на втором этапе была разработана ЭКД на двумерную позиционно-чувствительную многопроволочную камеру апертурой не менее 200×200 мм² с пространственным разрешением не менее 2×2 мм² с поканальной регистрацией сигнала. Цель выполнения работы: разработать ЭКД на двумерную позиционно-чувствительную многопроволочную камеру апертурой не менее 200×200 мм² с пространственным разрешением не менее 2×2 мм² с поканальной регистрацией сигнала. Чертежи, входящие в состав ЭКД, предназначены для использования при проведении дальнейших работ по разработке прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры апертурой не менее 200×200мм² с пространственным разрешением не менее 2×2 мм² с поканальной регистрацией сигнала. ЭКД представлена в составе:

- схема структурная;
- схема функциональная.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Эскизная конструкторская документация на двумерную позиционно-чувствительную многопроволочную камеру, в составе: 1) структурная схема; 2) функциональная схема. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.10_Эскизная конструкторская документация на двумерную позиционно-чувствительную многопроволочную камеру.pdf](#)

2.1.11 Разработка конструкторской документации на регистрирующий газоразрядный модуль с твердотельным конвертером с активной площадью не менее 100x100 мм², пространственным разрешением не хуже 1.5x1.5x0.05 мм³. (Совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ)

В ходе работ по проекту на втором этапе была разработана КД на регистрирующий газоразрядный модуль с твердотельным конвертером с активной площадью не менее 100×100 мм², пространственным разрешением не хуже 1.5×1.5×0.05 мм³. Цель выполнения работы: разработать КД на регистрирующий газоразрядный модуль с твердотельным конвертером с активной площадью не менее 100×100 мм², пространственным разрешением не хуже 1.5×1.5×0.05 мм³. Чертежи, входящие в состав КД, предназначены для использования при проведении дальнейших работ по разработке прототипа регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее 100×100 мм², пространственным разрешением не хуже 1.5×1.5×0.05 мм³. КД представлена в составе:

- чертеж общего вида;
- габаритный чертеж;
- сборочный чертеж со спецификацией, ведомость покупных изделий для сборки детекторной системы;
- пояснительная записка.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Конструкторская документация на регистрирующий газоразрядный модуль с твердотельным конвертером, в составе: 1) чертеж общего вида; 2) габаритный чертеж; 3) сборочный чертеж; 4) пояснительная записка. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.11_Конструкторская документация на регистрирующий газоразрядный модуль с твердотельным конвертером Пояснительная записка.pdf](#)

2.1.12 Разработка конструкторской документации на двумерный позиционно-чувствительный счетчик нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее 100x100 мм². (Совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ)

В ходе работ по проекту на втором этапе была разработана КД на двумерный позиционно-чувствительный счетчик нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее 100×100 мм². Цель выполнения работы: разработать КД на двумерный позиционно-чувствительный счетчик нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее 100×100 мм². Чертежи, входящие в состав КД, предназначены для использования при проведении дальнейших работ по разработке прототипа двумерный позиционно-чувствительный счетчик нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее 100×100 мм². КД представлена в составе:

- чертеж общего вида;
- габаритный чертеж;
- сборочный чертеж со спецификацией, ведомость покупных изделий для сборки детекторной системы;
- пояснительная записка.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Конструкторская документация на двумерный позиционно-чувствительный счетчик нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных ФЭУ, в составе: 1) чертеж общего вида; 2) габаритный чертеж; 3) сборочный чертеж; 4) пояснительная записка. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.12_Конструкторская документация на двумерный позиционно-чувствительный счетчик нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS6LiF и твердотельных ФЭУ_Пояснительная записка.pdf](#)

2.1.13 Разработка программного обеспечения для определения координаты конверсии нейтрона вдоль одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6 LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей, а также режекции гамма-фона с целью обеспечения существенного улучшения сигнал/шум. (Совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ)

В ходе работ по проекту на втором этапе была осуществлена разработка программного обеспечения для определения координаты конверсии нейтрона вдоль одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6 LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей, а также режекции гамма-фона с целью обеспечения существенного улучшения сигнал/шум. Цель выполнения работы: разработать программное обеспечение, позволяющее определить координаты конверсии нейтрона вдоль одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6 LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей, а также осуществить режекцию гамма-фона с целью обеспечения существенного улучшения сигнал/шум. Проведенные работы были частично отражены в статье «Модуль сбора и предварительной обработки данных с сетевым интерфейсом для многопроволочных пропорциональных камер с линией задержки», опубликованной в издании «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования» в 2022 г. Для описания работы с программой разработана программная документация, в состав которой входит: «Отчет о разработке программного обеспечения: описание применения и текст программы», а также «Руководство пользователя», представленные в составе документации Отчета 2 этапа к Договору № 539-100-1/2022 от 04 мая 2022 г. в рамках Соглашения № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Программная документация на ПО для определения координаты конверсии нейтрона, в составе: 1) текст программы; 2) описание применения; 3) руководство пользователя. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.13_Программная документация на ПО для определения координаты конверсии нейтрона_Руководство пользователя.pdf](#)

2.1.14 Разработка конструкторской документации на двумерную позиционно-чувствительную многопроволочную камеру апертурой не менее 200x200 мм² с пространственным разрешением не менее 2x2 мм² с поканальной регистрацией сигнала. (Совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ)

В ходе работ по проекту на втором этапе была разработана КД на двумерную позиционно-чувствительную многопроволочную камеру апертурой не менее 200×200 мм² с пространственным разрешением не менее 2×2мм² с поканальной регистрацией сигнала. Цель выполнения работы: разработать

КД на двумерную позиционно-чувствительную многопроволочную камеру апертурой не менее $200 \times 200 \text{ мм}^2$ с пространственным разрешением не менее $2 \times 2 \text{ мм}^2$ с поканальной регистрацией сигнала. Чертежи, входящие в состав КД, предназначены для использования при проведении дальнейших работ по разработке прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры апертурой не менее $200 \times 200 \text{ мм}^2$ с пространственным разрешением не менее $2 \times 2 \text{ мм}^2$ с поканальной регистрацией сигнала. КД представлена в составе:

- чертеж общего вида;
- габаритный чертеж;
- сборочный чертеж со спецификацией, ведомость покупных изделий для сборки детекторной системы;
- пояснительная записка.

При разработке конструкторской документации учитывалась информация, представленная в научной статье «Комплексная оценка состояния поверхности катода пропорциональной камеры после работы в эксперименте на большом адронном коллайдере», соавторами которой являются сотрудники НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ. Статья опубликована в ходе выполнения проекта в издании «Известия РАН. Серия физическая» в 2022 г. Переводной вариант статьи «Comprehensive Study of a Proportional Chamber Cathode's Surface after Its Operation in an Experiment at the Large 15 Hadron Collider» опубликован в издании «Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics» в 2022 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Конструкторская документация на двумерную позиционно-чувствительную многопроволочную камеру, в составе: 1) чертеж общего вида; 2) габаритный чертеж; 3) сборочный чертеж; 4) пояснительная записка. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.14_Конструкторская документация на двумерную позиционно-чувствительную многопроволочную камеру_Пояснительная записка.pdf](#)

2.1.15. Создание прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6 LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее $100 \times 100 \text{ мм}^2$. (Совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ)

На втором этапе проекта были проведены работы по созданию прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6 LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее $100 \times 100 \text{ мм}^2$. Цель выполнения работы: создать прототип двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6 LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее $100 \times 100 \text{ мм}^2$ для дальнейшего использования в рамках выполнения поставленных задач по проекту. Работа проводилась согласно п. 2.1.15 ПГ и п. 3.2.6 ТЗ. На рис. 2.1.15.1 а) представлен принцип работы прототипа двумерного ПЧС. При попадании нейтронов в активную область счетчика, в зависимости от места регистрации нейтрона длина его пробега до фотоумножителя L1-2-3-4 будет разной, следовательно, будет разное значение амплитуды на кремниевых фотоумножителях, осуществивших регистрацию.

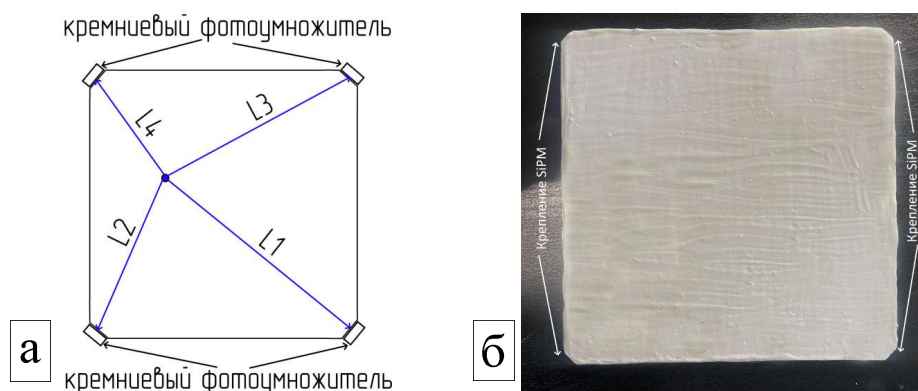


Рисунок 2.1.15.1. Прототип двумерного ПЧС. а) Принцип работы двумерного ПЧС; б) активная область прототипа 2Д-ПЧС

На рис. 2.1.15.1 б) представлено изображение активной области прототипа двумерного ПЧС на основе сцинтиллятора ZnS/6LiF. Световод покрыт отражающим составом (за исключением мест крепления SiPM),

способным отражать до 98.1% видимого излучения, что позволяет счетчику эффективнее регистрировать нейтроны.

При разработке двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6 LiF и SiPM рассматривался патент на изобретение №2782417 «Устройство для регистрации излучения», зарегистрированный 26.10.2022 г. в рамках выполнения работ по проекту.

Также при разработке принималась во внимание информация из статьи «Многослойный высокоэффективный сцинтилляционный счетчик нейтронов на основе SiPM и органического световода», опубликованной в издании «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования» в 2022 г. Статья написана исполнителями в рамках выполнения работ по проекту.

Переводной вариант статьи «Multilayer high-performance scintillation neutron counter based on SiPM and organic light guide» опубликован в издании «Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques» в 2022 г.

Результаты работы представлены в документации: «Отчет о разработке прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6 LiF», Акт изготовления, Программа и методика испытаний, Акт и протокол испытаний, входящей в состав Отчета 2 этапа к Договору № 539-100-1/2022 от 04 мая 2022 г. в рамках Соглашения № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт изготовления прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных ФЭУ. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.15_Акт изготовления прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS6LiF и твердотельных ФЭУ.pdf](#)
- Отчет о разработке прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS6LiF. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.15_Отчет о разработке прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS6LiF.pdf](#)
- Программа и методики испытаний прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных ФЭУ. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.15_Программа и методики испытаний прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS6LiF и твердотельных ФЭУ.pdf](#)
- Акт и протокол испытаний прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных ФЭУ. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.15_Акт и протокол испытаний прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS6LiF и твердотельных ФЭУ.pdf](#)

2.1.16 Разработка конструкции и изготовление контроллера управления детекторной системой для дифрактометра «СФЕРА». (Совместно с ИИИ РАН)

В рамках данной работы разработан и изготовлены контроллеры управления детекторной системой «СФЕРА». Внешний вид контроллера показана на рисунке 2.1.16.1.

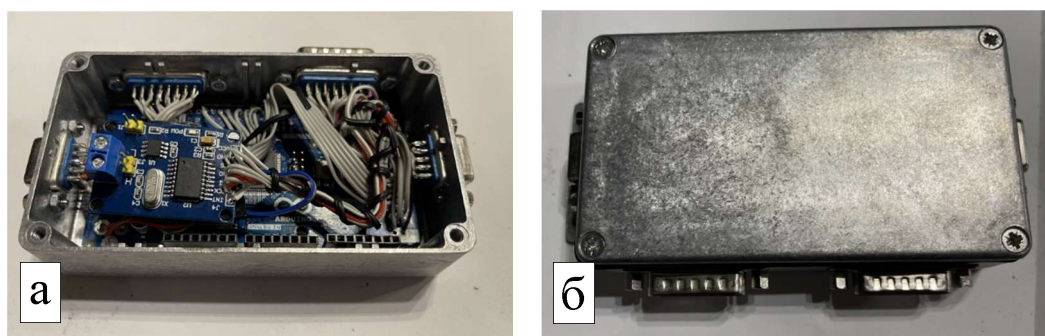


Рисунок 2.1.16.1. Внешний вид контроллера управления

Контроллер изготовлен на основе микроконтроллера ATMEGA2560 и содержит в себе модуль интерфейса CANBUS. Принципиальная схема контроллера показана на рисунке 2.1.16.2.

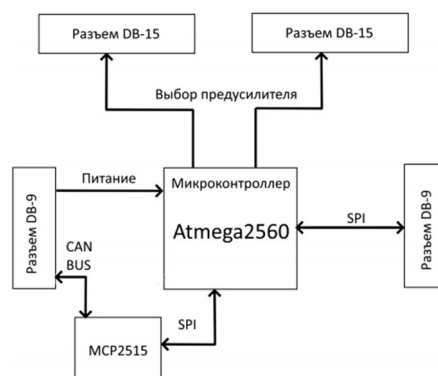


Рисунок 2.1.16.2. Принципиальная схема

Подробное описание и список поддерживаемых команд находятся в конструкторской документации ИЯИ РАН 02699122.412154.001.000И

Также в рамках работ по изготовлению написано ПО для управления порогом предусилителей, а также для калибровки усилителей. На ПО получены два Свидетельства о гос. Регистрации программы для ЭВМ.

Основные параметры контроллера:

- Интерфейс подключения -CANBUS
- Напряжение питания - +5В
- Максимальное количество поддерживаемых предусилителей – 36 штук
- Интерфейс управлением порогом - SPI
- Время установки порога для одиночного предусилителя – не более 2с

Для управления порогом множеством предусилителей по интерфейсу SPI используется 36 независимых линий SPI-SS (slave select). Сигналы SCLK и MOSI используются общие на все детекторы. На рисунке 2.1.16.3 показано расположение разъемов (КУДС).

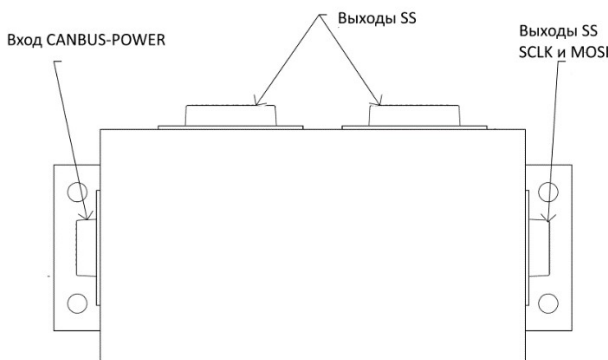


Рисунок 2.1.16.3. Описание разъемов

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Конструкторская документация контроллера управления детекторной системой «СФЕРА», в составе: 1) чертёж детали; 2) сборочный чертёж; 3) инструкция. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 2.1.16 Конструкторская документация Инструкция контроллера управления детекторной системой СФЕРА.pdf](#)
- Акт изготовления и отчет об изготовлении контроллера управления детекторной системой «СФЕРА». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 2.1.16 Акт изготовления Отчет об изготовлении контроллера управления детекторной системой СФЕРА.pdf](#)

2.1.17 Разработка и изготовление системы юстировки детекторной системы дифрактометра «СФЕРА». (Совместно с ИЯИ РАН)

Система юстировки детекторной системы дифрактометра «СФЕРА» предназначен для дифрактометра «СФЕРА». Юстировка колец обеспечивается за счет точности изготовления и жесткого крепления колец относительно корпуса детектора. При проектировании колец детектора мы принимали во внимание предыдущие разработки и результаты моделирования, выполненные на 1 этапе.

На рисунке 2.1.17.1 а) показан внешний вид внутренних колец нейтронного дифрактометра «СФЕРА».

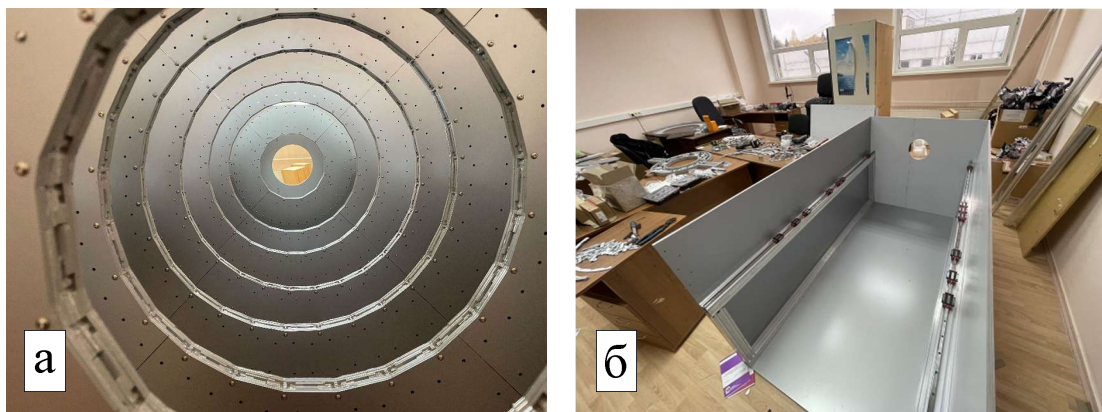


Рисунок 2.1.17.1. Система юстировки детекторной системы дифрактометра «СФЕРА». а) Внешний вид внутренних колец; б) внешний вид системы юстировки детекторной системы

Принцип юстировки основан на жестком креплении корпуса и зафиксированных на них направляющих. Использование жесткого корпуса, собранного из алюминиевого конструкционного профиля (АКП) и линейных направляющих позволяет получить параллельность направляющих с отклонением не более 1 мм на м. На рисунке 2.1.17.1 б) показан внешний вид системы юстировки детекторной системы дифрактометра «СФЕРА».

АКП размещён на корпусе дифрактометра, в заранее изготовленных отверстиях с точностью не хуже 0.5 мм. Кольца нейтронного дифрактометра передвигаются на каретках, расположенных на линейных направляющих. Кольца нейтронного дифрактометра крепятся на каретках с точностью не хуже 1 мм.

Система юстировки детекторной системы дифрактометра «СФЕРА» предназначена для дифрактометра «СФЕРА».

Технические характеристики:

- Количество колец 7 штук
- Длина перемещения 2000 мм
- Перемещение параллельно нейтронному пучку с отклонением от параллельности не более 1 градус.

Юстировка колец обеспечивается за счет точности изготовления и крепления колец относительно корпуса детектора.

Принцип юстировки основан на жестком креплении корпуса и зафиксированных на них направляющих. Использование жесткого корпуса, собранного из алюминиевого конструкционного профиля (АКП) и линейных направляющих позволяет получить параллельность направляющих с отклонением не более 1 мм на м.

АКП размещён на корпусе дифрактометра, в заранее изготовленных отверстиях с точностью не хуже 0.5 мм. Кольца нейтронного дифрактометра передвигаются на каретках, расположенных на линейных направляющих. На рисунке 2.1.17.2 показаны различные варианты размещения колец относительно центрального кольца. Кольца нейтронного дифрактометра крепятся на каретках с точностью не хуже 1 мм.



Рисунок 2.1.17.2. Внешний вид колец детектора размещённых в различных конфигурациях

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Конструкторская документация системы юстировки детекторной системы дифрактометра «СФЕРА», в составе: 1) чертёж детали; 2) сборочный чертёж; 3) инструкция. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.17_Конструкторская документация_Инструкция системы юстировки детекторной системы дифрактометра СФЕРА.pdf](#)
- Акт изготовления и отчет об изготовлении системы юстировки детекторной системы дифрактометра «СФЕРА». ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.17_Акт изготовления_Отчет об изготовлении системы юстировки детекторной системы дифрактометра СФЕРА.pdf](#)

2.1.18 Изготовление комплекта счетчиков для детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА». (Совместно с ИЯИ РАН)

Проведена полная сборка комплекта счетчиков тепловых нейтронов количеством 155 штук. На рисунке 2.1.18.1 приведена фотография нейтронных детекторов.



Рисунок 2.1.18.1. Внешний вид нейтронных детекторов

Детектор состоит из гомогенного оптически прозрачного световода с вырезанным в нем щелями. Количество слоев сцинтиллятора 3. По краям световода расположены два сверхширокоугольных объектива с целенаправленно увеличенной дисторсией (“Рыбий глаз”). Размеры детектора 5x60 мм толщина 6мм, размер чувствительной области 5x50. На рисунке 2.1.18.2 а) показан внешний вид одиночного детектора.

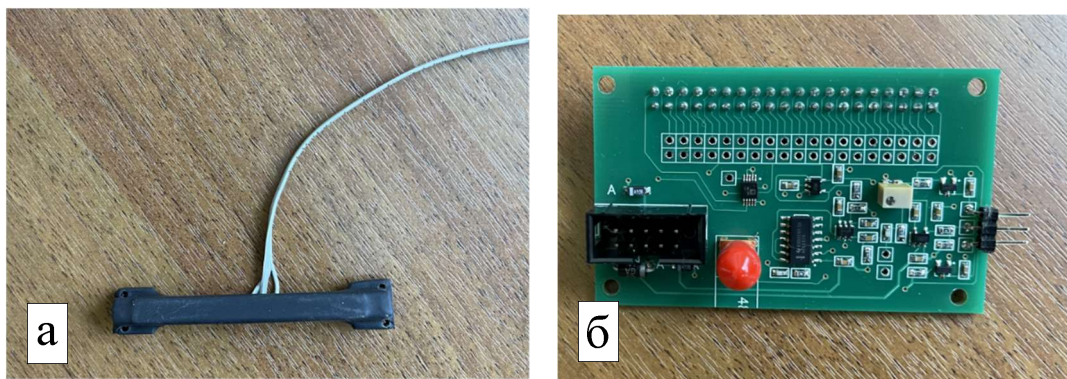


Рисунок 2.1.18.2. а) Внешний вид одиночного детектора с креплением; б) внешний вид предусилителя

Детекторы предназначены для установки на кольца нейтронного дифрактометрах “СФЕРА”. Также изготовлен комплект предусилителей для работы с нейтронными детекторами, на рисунке 2.1.18.2 б) показан внешний вид предусилителя. По результатам работы подана заявка на патент.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт изготовления и отчет об изготовлении комплекта счетчиков тепловых нейтронов для детекторной системы дифрактометра «СФЕРА». ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.18_Акт изготовления_Отчет об изготовлении комплекта счетчиков для детекторной системы дифрактометра СФЕРА.pdf](#)

2.1.19 Изготовление кольцевого детектора нейтронов для дифрактометра «СФЕРА (часть 2):

А) изготовления защиты;

Б) изготовление крепления кольцевых детекторов и блоков детектора.

(Совместно с ИЯИ РАН)

Произведено изготовления второй части сборки детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА». На рисунке 2.1.19.1 показано крепление детектора и крепление колец в корпусе нейтронного детектора.



Рисунок 2.1.19.1. Внешний вид крепления детектора и крепления колец в корпусе

В рамках работ произведена сборка 7 колец и размещение их в корпусе дифрактометра.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт изготовления и отчет об изготовлении второй части сборки детекторной системы нейтронного дифрактометра СФЕРА. ФАЙЛ: [Прил. ПГ_2.1.19_Акт изготовления Отчет об изготовлении второй части сборки детекторной системы нейтронного дифрактометра СФЕРА.pdf](#)

2.1.20 Разработка ускорительной и реакторной технологии.

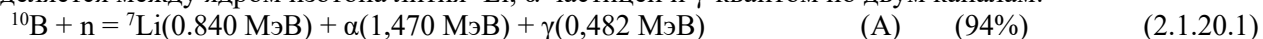
Разработка технологии нанесения покрытий на основе карбида бора B_4C на алюминиевые пластины толщиной 0,5 мм для дальнейшего использования в качестве конвертера нейтронного излучения в детекторах на ускорительных и реакторных источниках нейтронов

Нанесение тонкоплёночных покрытий из карбида бора B_4C , обогащённого изотопом ^{10}B , на алюминиевые листы толщиной 0,5 мм площадью не менее $200 \times 200 \text{ мм}^2$ для дальнейшего использования в качестве конвертера нейтронного излучения для применения в детекторах нейтронного излучения на ускорительных и реакторных источниках нейтронов.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ. НАЗВАНИЕ: ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КАРБИДА БОРА B_4C НА АЛЮМИНИЕВЫЕ ОСНОВАНИЯ, В ТОМ ЧИСЛЕ НА АЛЮМИНИЕВУЮ ФОЛГУ.

Важной и актуальной научной задачей является создание высокоэффективных детекторов большой площади для регистрации медленных нейтронов, конвертеры которых содержат изотоп бора ^{10}B . Такие детекторы смогут заменить существующие детекторы на основе 3He во многих областях применения, причём для некоторых задач они могут иметь даже лучшие характеристики.

Сечение взаимодействия изотопа бора ^{10}B с тепловыми нейтронами 0,025МэВ составляет 3800 барн. Медленные нейтроны взаимодействуют с ядрами изотопа бора ^{10}B с выделением 2,78МэВ. Энергия распределяется между ядром изотопа лития 7Li , α -частицей и γ -квантом по двум каналам:



Природный (естественный) бор состоит из двух изотопов ^{10}B (18%) и ^{11}B (82%). Промышленность в настоящее время производит для нужд атомных электростанций аморфный бор, обогащённый по изотопу ^{10}B не менее 95%. Бор образует большое количество твёрдых соединений. Среди них наибольший интерес представляет карбид бора B_4C , обладающий высокой износостойкостью, высокой температурой плавления

и высокой химической стойкостью. В настоящее время доступно приобретение карбида бора, в состав которого входит более 95% изотопа ^{10}B .

Длина пробега тепловых нейтронов в карбиде бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ до ослабления потока в $e \approx 2,7$ раз составляет около 30 мкм. Длина пробега частиц распада в материале карбида бора, учитывая кинетические энергии частиц составляет 3,5 мкм для α -частицы и 1,7 мкм для ^7Li . С одной стороны, для уменьшения потерь энергии частиц при выходе из слоя карбида бора, толщина покрытия должна быть наименьшей. С другой стороны, для обеспечения большего числа захвата нейтронов, толщина покрытия должна быть наибольшей.

Оптимальная толщина однослойного покрытия по расчётам, выполненным используя методику Монте-Карло, составляет около 2,5 мкм. При этом эффективность регистрации составляет не более 6%. Для повышения эффективности собирают многослойные детекторы. Лучшим решением для построения многослойного детектора, состоящего из более 30 слоёв, является конструкция, содержащая 0,5 мкм в первых 10 слоях, далее 0,85 мкм, и 1,5 мкм в последних 7 слоях. При этом эффективность регистрации не более 60%.

Значительных успехов в разработке детекторов тепловых нейтронов с конвертером на основе карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ удалось добиться учёным из детекторной группы строящегося в г. Лунд (Швеция) Европейского центра ESS (The European Spallation Source). Совместно с сотрудниками Линчёпингского Университета разработана технология нанесения тонкоплёночных покрытий карбида бора на алюминиевые основания. Технология, созданная в Линчёпингском университете (Швеция), основана на магнетронном распылении мишени из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ и позволяет наносить тонкоплёночные покрытия $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на алюминиевые листы большой площади толщиной не менее 0,5 мм и толстые пластины. Эти материалы представляют собой листовые борные конвертеры нейтронов. На базе этих конвертеров изготавливаются многослойные детекторы нейтронов для ESS «multi-blade» и «multi-grid», конструкция которых представляет собой многокамерный газовый детектор, содержащий параллельно установленные листы алюминия от 0,5 мм до 2 мм с двухсторонним тонкоплёночным покрытием $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной от 0,5 мкм до 7 мкм. Недостатком технологии является то, что используемая технология основана на нагреве подложек из алюминия до 500°C . При остывании, из-за разности коэффициентов линейного расширения алюминия и карбида бора, в покрытиях возникают высокие механические напряжения, приводящие к деформации листов и пластин, возможно даже осыпание нанесённого слоя. Кроме того, так как температура плавления алюминия составляет 660°C , то эта технология не позволяет выполнять нанесение карбида бора на алюминиевую фольгу.

Новая технология нацелена на получение тонкоплёночных покрытий из карбида бора B_4C , обогащённого изотопом ^{10}B , на любых алюминиевых основаниях большой площади, в том числе и на фольге, что возможно при температурах оснований от 50°C до 200°C . При температуре 50°C внутренние напряжения значительно меньше деформируют основания, особенно фольгу, что позволяет изготавливать борные детекторы с применением конвертеров из фольги. Технология нанесения плёнок должна удовлетворять следующим характеристикам:

- 1) обеспечивать нанесение тонких плёнок с высокой адгезией на алюминиевые основания большой площади при температурах оснований от 50°C до 200°C ;
- 2) обеспечивать нанесение тонких плёнок с высокой адгезией к основанию;
- 3) обеспечивать покрытие большой площади, не менее $200 \times 200 \text{ мм}^2$;
- 4) обеспечивать покрытие с высокой гибкостью плёнки для применения на основаниях из алюминиевой фольги;
- 5) обеспечивать высокую плотность материала плёнки;
- 6) обеспечивать покрытие с высокой однородностью толщины по всей поверхности;
- 7) обеспечивать высокую повторяемость нанесения покрытий заданной толщины;
- 8) обеспечивать высокую чистоту от примесей тонкоплёночного покрытия.

Создание тонкоплёночных конвертеров на алюминиевых основаниях с требуемыми характеристиками является сложной технической и научной задачей.

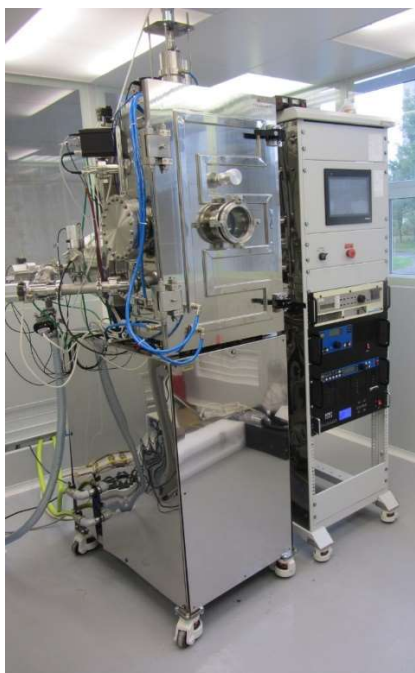


Рисунок 2.1.20.1. Лабораторная вакуумная установка VSR300

В основу решения поставленной технической задачи заложена идея замены нагрева всего основания нагревом поверхности формируемого плёночного покрытия, что возможно за счёт падающего на поверхность растущего покрытия потока высокоэнергичных ионов рабочего газа – аргона. Техническое решение получения тонкоплёночных покрытий из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ при низких температурах заключается в формировании покрытий с применением магнетронного распыления мишени из карбида бора с ионным ассистированием. Работы выполнены на лабораторной вакуумной установке VSR-300 (сборка компании РОБВАК г.Фрязино), предназначенной для термического резистивного распыления. Установка изображена на фото рис. 2.1.20.1 Установка реконструирована под магнетронное распыление сотрудниками Государственного университета «Дубна» совместно с сотрудниками Лаборатории нейтронной физики Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна). На рис. 2.1.20.2 приведена модель реконструкции установки. На рис. 2.1.20.3 приведено фото реконструированной установки. Здесь 1 – ТЭН для нагрева камеры; 2 – крепление с подложками 6; 3 – магнетрон с мишенью $^{10}\text{B}_4\text{C}$; 4 – магнетрон с мишенью Al; 5 – ионный источник. Из-за особенности конструкции камеры VSR-300 U-образного типа размером 400(Ш)х700(В) мм два сбалансированных магнетрона (3 и 4 рис. 2.1.20.2, 2.1.20.3) и ионный источник 5 размещены в центре камеры. Один магнетрон оснащён мишенью $^{10}\text{B}_4\text{C}$, второй – мишенью Al, обе мишени размером $5 \times 100 \times 400 \text{ мм}^3$ и имеют косвенное охлаждение водой. Ионный источник 5 замкнутого дрейфа, формирующий два параллельных ленточных луча шириной 2 мм и длиной 400 мм для очистки и ассистирования, размещён между магнетронами. Нанесение покрытия осуществляется на внутреннюю поверхность крепления 2, образующего цилиндрический барабан четырьмя подложками 6 размером $400 \times 280 \text{ мм}^2$ из алюминиевого листа толщиной 0,5 мм либо. Здесь же может закрепляться алюминиевая фольга или высокотемпературные полимерные плёнки – лавсановая или полиимидная закреплённые в специальных оправках. В центральной части подложек размещаются «свидетели», представляющие собой пластинки толщиной 0,2 мм из кремния, полированного в кристаллической плоскости $\langle 100 \rangle$. Магнитная система магнетронов выполнена на основе постоянных магнитов Nd-Fe-B собранных в сложную магнитную систему для увеличения ширины эрозионной канавки. Магнитное поле над поверхностью мишени составляет около 0,1 Тл. Расстояние мишень – подложка 80 мм. В верхней части камеры размещён ТЭН (1 рис.2.1.20.3) для прогрева камеры и подложек до 250°C

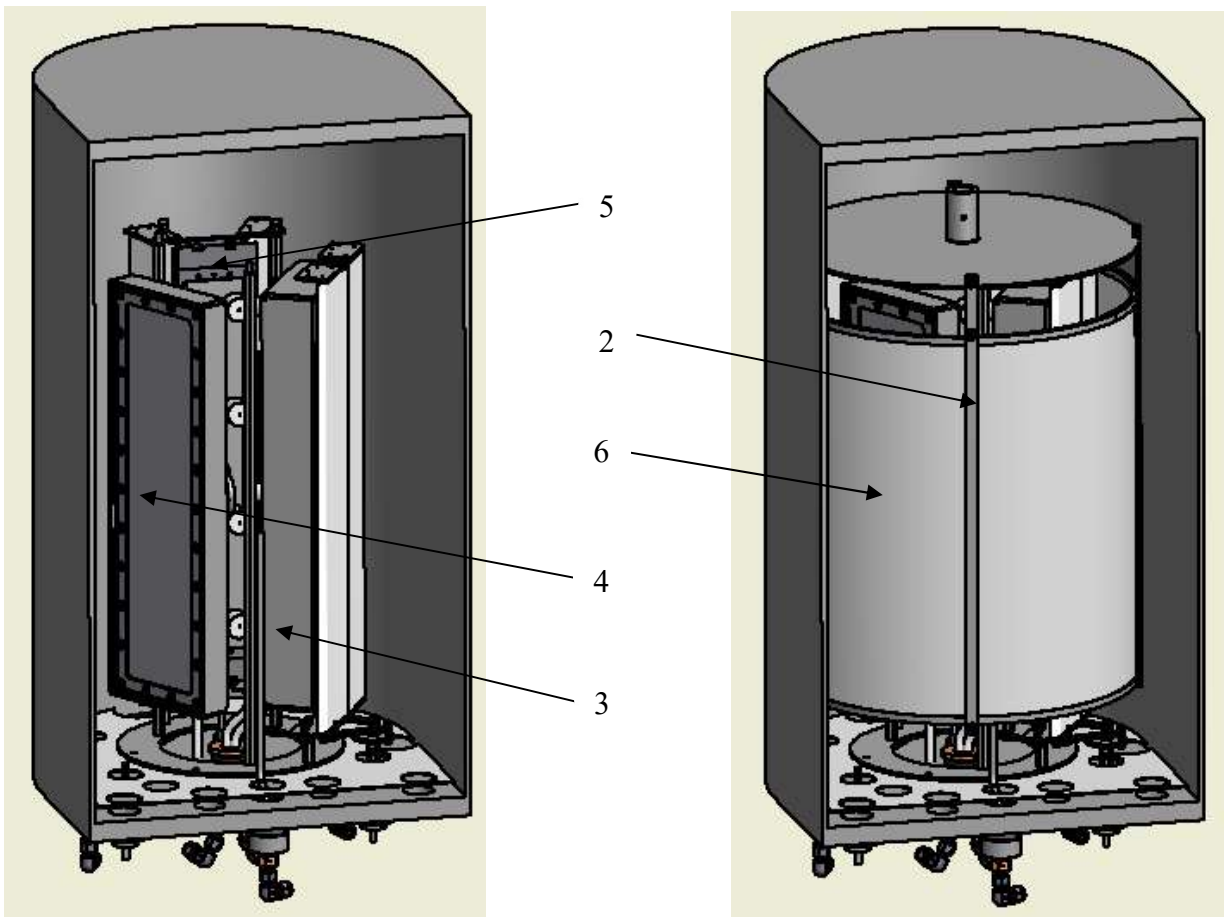


Рисунок 2.1.20.2. Модель реконструкции установки магнетронного напыления

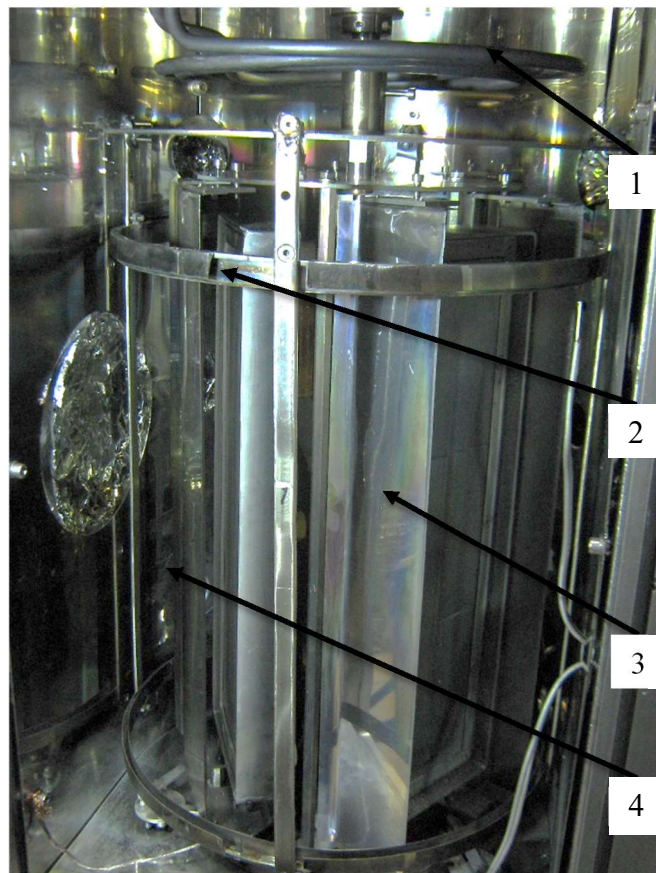


Рисунок 2.1.20.3. Конструкция камеры VSR-300.

Результаты получаемых покрытий описаны в работе «Формирование тонких плёнок карбида бора, обогащённого изотопом ^{10}B , при низких температурах» А.Г.Колесников и др. DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.5.290.299>, выполненной при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 года (внутренний номер 15.СИН.21.0021).

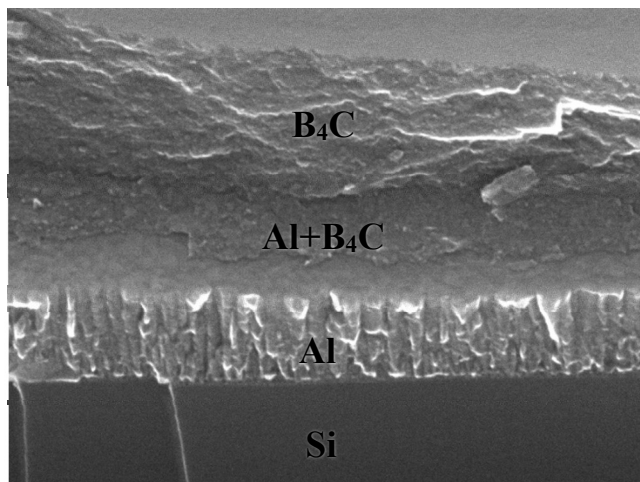


Рисунок 2.1.20.4. Структура плёнки, выращенной магнетронным напылением.

На рис. 2.1.20.4 приведена структура плёнки, выращенной при 50°C магнетронным распылением мишени $^{10}\text{B}_4\text{C}$ при ионном ассистировании. На свидетеле из пластины монокристаллического кремния видно кремниевое основание свидетеля, на которое с целью увеличения адгезии к алюминиевому основанию нанесён слой алюминия 280 нм, затем нанесён переходной слой с постепенным уменьшением концентрации алюминия и увеличением концентрации $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной 70 нм, затем слой $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной 500 нм.

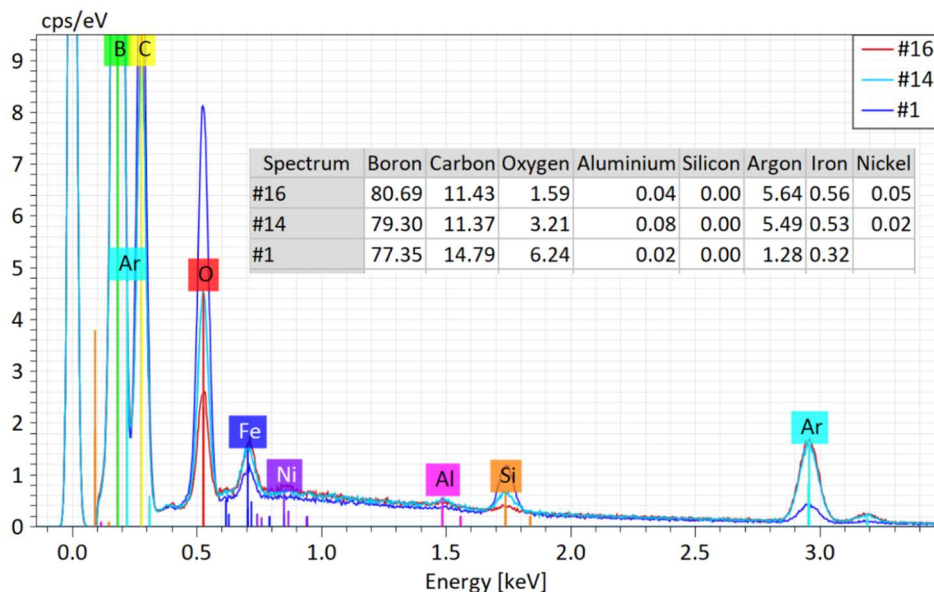


Рисунок 2.1.20.5. Энергодисперсионный рентгеновский спектр образцов плёнок

Если слой алюминия представляет собой столбчатую структуру, то структура плёнки $^{10}\text{B}_4\text{C}$ существенно меняется за счёт применения ионного ассистирования: столбчатой структуры нет, плёнка представляет собой плотную структуру, состоящую из неориентированных кристаллов размером в несколько нанометров.

На рис. 2.1.20.5 приведен энергодисперсионный рентгеновский спектр трёх образцов плёнок, выращенных при разных условиях: №1 без ионного ассистирования, № 14 при температуре 200°C с ионным ассистированием, №16 при температуре 50°C с ионным ассистированием. Увеличение содержания аргона в составе плёнки, выращенной при 50°C связано с применением ионного ассистирования при осаждении слоя $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Однако при этом существенно уменьшается содержание кислорода в плёнке. Наилучшего качества формируются плёнки $^{10}\text{B}_4\text{C}$ при температуре 50°C .

С помощью новой технологии получен новый тонкоплёночный функциональный материал на основе $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Поверхность плёнки, осаждаемой при температуре 50°C с применением ионного ассистирования, отличается большей гладкостью. Плотная мелкозернистая структура даёт такие свойства как высокая прочность и высокая эластичность. Плёночное покрытие обладает высокой гибкостью и трещиностойкостью. Формирование плёнок при этой температуре даёт возможность нанесения покрытий $^{10}\text{B}_4\text{C}$ не только на алюминиевую фольгу, а также на полимерные плёнки, и в первую очередь на радиационно-стойкие лавсановые и полиимидные плёнки толщиной около 20 мкм, что значительно расширяет разнообразие создаваемых детекторов нейтронов.

В настоящее время на основе этой технологии выполнено масштабирование лабораторной установки VSR300 до промышленной установки линейного продольного сканирования BATT 800 с площадью подложки $700 \times 1200 \text{ мм}^2$, устанавливаемой в Опытно-экспериментальном участке (ОЭУ) изготовления детекторов нейтронов на основе конвертора из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Кроме этого выполнена модернизация вакуумной установки VSR300-1 под нанесение карбида бора на рулонные материалы.

В рамках соглашения № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 года (внутренний номер 15.СИН.21.0021) изготовлен и испытан газовый детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B_4C на алюминиевой подложке. В детекторе применялись конвертеры из алюминиевых листов 200×200 мм толщиной 0,5 мм, на которые были нанесены покрытия карбида бора, выполненные на установке VSR300 по описанной технологии. На рис. 2.1.3.1 раздела 2.1.3 (**Изготовление и испытания газового детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B_4C на алюминиевой подложке**) приведено фото регистрируемой части детектора с таким конвертером, толщина покрытия 200 нм (зелёного цвета).

Детектор предназначен для проведения исследований на канале №4 реактора ИБР-2 - установка ЮМО (Станция малоуглового рассеяния нейтронов) и будет использоваться в качестве монитора тепловых нейтронов. Детектор работает в пропорциональном режиме при минимальном газовом усилении для исключения создания большого объёмного заряда.

На рис. 2.1.3.4 раздела 2.1.3 приведено сравнение амплитудных спектров, полученных с применением конвертеров по описанной технологии с конвертером на стекле, предоставленном Европейским центром ESS (The European Spallation Source). Толщина слоя $^{10}\text{B}_4\text{C}$ одинакова и составляет 1000 нм. Эффективность регистрации детектора с конвертером по описанной технологии на 25% меньше, чем эффективность конвертера от ESS. Это связано с меньшим содержанием в плёнке покрытия изотопа ^{10}B .

Большой объём проведённых измерений с газовым детектором медленных нейтронов с твердотельным конвертером B_4C на алюминиевой подложке и полученные результаты подтверждают готовность детектора к полноценной эксплуатации. Установка детектора на спектрометр ЮМО канала №4 реактора ИБР-2 запланирована на 2023 год.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт определения уровня готовности технологии нанесения тонкоплёночных покрытий из карбида бора B_4C на алюминиевые основания, в том числе на алюминиевую фольгу. ФАЙЛ: [Прил. ПГ_2.1.20_Акт определения уровня готовности технологии нанесения тонкоплёночных покрытий из карбида бора \$\text{B}_4\text{C}\$ на алюминиевые основания.pdf](#)
- Отчет об оценке готовности технологии нанесения тонкоплёночных покрытий из карбида бора B_4C на алюминиевые основания, в том числе на алюминиевую фольгу. ФАЙЛ: [Прил. ПГ_2.1.20_Отчет об оценке готовности технологии нанесения тонкоплёночных покрытий из карбида бора \$\text{B}_4\text{C}\$ на алюминиевые основания.pdf](#)
- Протокол проведения исследований образцов пленок карбида бора. ФАЙЛ: [Прил. ПГ_2.1.20_Протокол проведения исследований образцов пленок карбида бора.pdf](#)
- Техническое задание на разработку технологии нанесения тонкоплёночных покрытий из карбида бора B_4C на алюминиевые основания, в том числе на алюминиевую фольгу для дальнейшего использования в качестве конвертера нейтронного излучения в детекторах на ускорительных и реакторных источниках нейтронов. ФАЙЛ: [Прил. ПГ_2.1.20_Техническое задание на разработку технологии нанесения тонкоплёночных покрытий из карбида бора \$\text{B}_4\text{C}\$ на алюминиевые основания.pdf](#)

Работы исследователей в возрасте до 39 лет

2.1.21 Теоретическое исследование отражения нейтронов в рефлектометрическом режиме и генерации вторичного излучения от многослойных наноструктур, содержащих сильнопоглощающие изотопы гадолиния и бора. (Совместно с ИФМ УО РАН)

Объектом исследования являются планарные многослойные наноструктуры на основе гадолиния и бора. Цель работы – теоретическое исследование отражения нейтронов в рефлектометрическом режиме и генерации вторичного излучения от многослойных наноструктур, содержащих сильнопоглощающие изотопы гадолиния и бора. Задачи второго этапа проекта полностью выполнены. Проведенное нами теоретическое моделирование показало, что тонкие пленки и слоистые наноструктуры, содержащие сильнопоглощающие изотопы гадолиния и бора, могут быть использованы для создания детекторов тепловых нейтронов.

Анализ полученных теоретических результатов по отражению нейтронов совместно с экспериментальными данными позволит определить структурные параметры тонких пленок и наноструктур, оптимальные для использования в детекторах нейтронов. Полученные результаты будут способствовать созданию новых материалов для детектирования нейтронов на основе тонких пленок и наноструктур, содержащих сильнопоглощающие изотопы гадолиния и бора.

Развитие микроэлектроники инициирует появление новых материалов и совершенствование способов их диагностики. Один из перспективных методов исследования новых материалов связан с использованием рассеяния нейтронов, его развитие особенно актуально в связи с запуском высокопоточного исследовательского реактора нового поколения ПИК и с необходимостью создания приборной базы реактора.

Связанное с этим направление, активно развивающееся в последнее время – использование сильнопоглощающих изотопов для создания твердотельных детекторов тепловых нейтронов. Такие детекторы представляют большой интерес для применения ввиду дефицита изотопа ^3He , на основе которого обычно изготавливаются газовые детекторы нейтронов. Изотопы с сильным резонансным поглощением нейтронов предоставляют также уникальную возможность – плотность длины рассеяния нейтронов можно изменять контролируемым образом прямо в ходе эксперимента, варьируя длину волны нейтронов. Это можно использовать для решения фазовой проблемы, вводя в исследуемые образцы опорный слой, содержащий изотопы с резонансным поглощением.

Практически во всех веществах поглощение тепловых нейтронов незначительно, но для некоторых изотопов оно существенно. Например, два изотопа гадолиния, ^{155}Gd и ^{157}Gd , а также изотоп ^{10}B имеют очень большие сечения захвата тепловых нейтронов. Большие величины сечений связаны с наличием в ядрах упомянутых изотопов состояний, с характерной энергией перехода, лежащей в диапазоне энергий тепловых нейтронов. В результате возникает резонансное взаимодействие ядра с тепловым нейтроном, следствием которого является очень высокая вероятность поглощения нейтрона ядром с последующим испусканием гамма-квантов и/или альфа-частиц.

Возможно применение этого уникального свойства бора и гадолиния и в научных исследованиях, где применяются тепловые нейтроны, в частности, в нейтронной рефлектометрии. Изучение поглощения нейтронов одновременно с отражением и генерацией вторичного излучения существенно расширяет возможности диагностики и, потому, представляет большой интерес. Но процессы распространения нейтронов в сильнопоглощающих средах слабо изучены и работ по этой тематике не очень много. Кроме того, тонкие пленки гадолиния используются и в нейтронных поляризаторах и учет процессов поглощения нейтронов необходим для точного расчёта параметров таких устройств.

Соответственно, актуальность исследований сильнопоглощающих систем предопределяется востребованностью результатов как для создания приборной базы для нейтронных рефлектометров, так и для развития методов анализа экспериментальных данных. Резонансное поглощение нейтронов, например, изотопами гадолиния, сопровождается генерацией вторичного излучения, детектирование которого открывает новые возможности в развитии методов нейтронной нанодиагностики. Данная работа направлена на изучение отражения нейтронов в рефлектометрическом режиме и генерации вторичного излучения в многослойных системах, содержащих слои из сильнопоглощающих веществ (природный гадолиний или карбид бора B_4C). Для анализа различных ситуаций используются модельные численные эксперименты. Полученные результаты дадут возможность оптимального выбора сильнопоглощающих систем для различных задач, как прикладных, так и научных.

Для модельных исследований и проверки теоретических результатов [2.1.21.1] были использованы следующие образцы, содержащие сильнопоглощающий элемент Gd или B:

1. Si//Nb(10 Å)/Gd(100 Å)/Nb(10 Å) и Si//Cr(10 Å)/Gd(50 Å)/Cr(10 Å) – гадолиний в обкладках из непоглощающих слабоокисляющихся элементов. Обкладки нужны для защиты слоя Gd от реакций с подложкой и воздухом. Образцы предназначены для непосредственных измерений коэффициента поглощения и интенсивности вторичного излучения при различных углах падения первичного нейтронного пучка.
2. Si//Cr(100 Å)/[Fe(80 Å)/Cr(10.5 Å)]₈/Cr(20 Å)/Gd(50 Å)/V(50 Å) – сверхрешётка с антиферромагнитным упорядочением слоёв Fe. Предназначена для экспериментов по восстановлению комплексного коэффициента отражения методом опорного слоя Gd [2.1.21.1] и исследованию в рамках этого подхода сложных магнитных систем. Приготовлено два аналогичных образца для дополнительной проверки полученных результатов.
3. Серия образцов Si//Nb(500 Å)/V(100 Å)/Gd(t Å)/V(100 Å)/Nb(500 Å), где t = 12 Å, 20 Å, 30 Å. Это образцы резонаторного типа, для экспериментов по исследованию режима стоячих нейтронных волн в плёнке и влияния на него толщины поглощающего слоя. Эффекты стоячих волн могут иметь и практическое применение – возможность определения угла падения (на времяпролётных инструментах) или длины волны (на монохроматических), используемых в эксперименте.
4. Серия образцов Al₂O₃//Ta(100 Å)/V(t Å)/Gd(25 Å)/V(t Å)/Ta(100 Å), где t = 250 Å, 500 Å, 700 Å, 1000 Å. Также образцы резонаторного типа, для исследования влияния на режим стоячих нейтронных волн ширины потенциальной ямы, которой является слой ванадия, имеющего отрицательную действительную часть плотности длины рассеяния.
5. Al₂O₃//Ta(100 Å)/Gd(5000 Å)/Ta(100 Å). Толстая плёнка гадолиния в защитных обкладках. Необходима для проведения экспериментов со значительным поглощением, которое не может обеспечить тонкая плёнка.

По результатам теоретического моделирования определены оптимальные условия постановки эксперимента с образцами-резонаторами (п.3 и п.4) на времяпролётном инструменте (такими являются РЕМУР и РЕФЛЕКС). При работе с изотопами гадолиния оптимальным диапазоном углов падения первичного пучка является 1 – 1.5 мрад. В этом случае из пучка вырезаются те длины волн (0.5 – 4 Å), для которых зависимость плотности длины рассеяния гадолиния от энергии нейтронов в наибольшей степени отличается от константы и имеет заметную мнимую часть, то есть, сильное поглощение. Кроме того, в этом же диапазоне лежит максимум распределения интенсивности по длинам волн в первичном пучке.

Для образцов резонаторного типа лучше подходит подложка из сапфира Al₂O₃, чем из кремния Si. Это связано с тем, что у Si примерно в 2 раза меньше действительная часть плотности длины рассеяния ($2.14 \cdot 10^{-6} \text{ Å}^{-2}$), чем у Al₂O₃ ($5.708 \cdot 10^{-6} \text{ Å}^{-2}$), что приводит к уменьшению критического угла, то есть к меньшей длине области полного внешнего отражения в шкале q . Из-за этого картина резонансов оказывается искажённой (рис. 2.1.21.1).

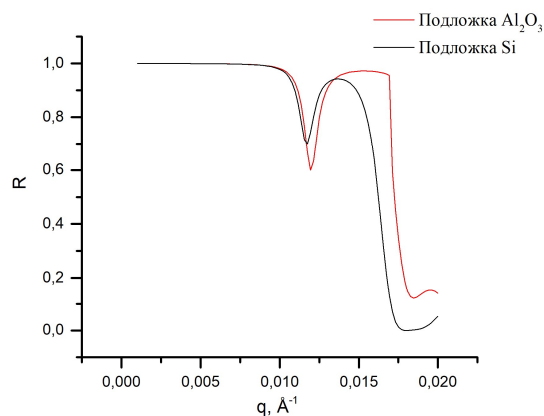


Рисунок 2.1.21.1. Сравнение резонансов в области полного внешнего отражения для одной и той же системы Nb(500 Å)/V(100 Å)/Gd(30 Å)/ V(100 Å)/Nb(500 Å) на различных подложках

Чтобы достичь значительного поглощения (доли единицы) в образце, содержащем Gd или иное сильнопоглощающее вещество, можно изготовить толстую плёнку (5000 Å, из п. 5) и пропустить через неё первичный пучок под острым углом. Например, при угле падения 10°, луч проходит путь в веществе почти 3 мкм. Это позволяет получить достаточно большой коэффициент поглощения плёнки (рис. 2.1.21.2) и, следовательно, высокую интенсивность вторичного излучения. Зависимость коэффициента поглощения от длины волны слабо нелинейная вследствие наличия резонансного взаимодействия с нейтронами в исследуемой области длин волн.

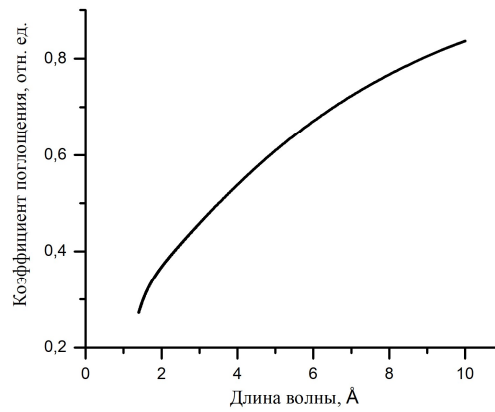


Рисунок 2.1.21.2. Коэффициент поглощения системы $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{Gd}(5000 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$, угол падения первичного пучка 10°

В случае использования карбида бора B_4C вместо гадолиния, коэффициент поглощения примерно в 15-20 раз меньше по абсолютной величине, но зависит от длины волны линейным образом, поскольку резонансов в данной области энергий не имеет. Кроме того, при поглощении в B_4C не возникает трудноэкранируемого гамма-излучения. Рождаются альфа-частицы, но их энергия невысока, и они легко поглощаются даже тонкими защитными экранами. Эти обстоятельства, а также более низкая цена, могут сделать именно карбид бора наиболее перспективным материалом для твёрдотельных детекторов нейтронов. Его можно использовать и в резонаторных образцах в качестве поглощающего слоя.

Поглощение нейтронов сопровождается генерацией вторичного излучения. В случае изотопов Gd это гамма-излучение, связанное с переходом возбуждённого ядра на более низкий энергетический уровень. В случае изотопа ^{10}B это альфа-излучение. Наблюдаемая интенсивность $I(q)$ любого вида излучения описывается формулой [2.1.21.2]:

$$I(q) = \frac{1}{q} \int_0^D \tilde{V}(q, z) |\psi(q, z)|^2 dz. \quad (2.1.21.1)$$

Здесь $q = 4\pi \sin \theta / \lambda$ – нормальная компонента изменения волнового вектора при отражении, θ – угол падения, λ – длина волны первичного пучка, z – координата вдоль нормали к поверхности плёнки (глубина), отсчитывается от подложки, D – толщина плёнки. \tilde{V} – мнимая часть потенциала рассеяния, описывает поглощение. $\psi(q, z)$ – волновая функция нейтрона в плёнке, точнее – её компонента вдоль оси z :

$$\psi(q, z) = A(q, z)[\exp(iqz) + B(q, z)\exp(-iqz)]. \quad (2.1.21.2)$$

Функции $A(q, z)$ и $B(q, z)$ представляют собой комплексные коэффициенты прохождения и отражения соответственно. Они могут быть рассчитаны методом фазово-амплитудных функций [2.1.21.3] или любым другим способом (алгоритм Парратта [2.1.21.4] или метод оптических матриц [2.1.21.5]).

На рис. 2.1.21.3 представлены коэффициенты прохождения (а), отражения (б) и поглощения (в), а также интенсивность вторичного излучения (г) для двух аналогичных сильнопоглощающих систем: $\text{Al}_2\text{O}_3//^{10}\text{B}_4\text{C}(400 \text{ \AA})$ и $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Gd}(400 \text{ \AA})$.

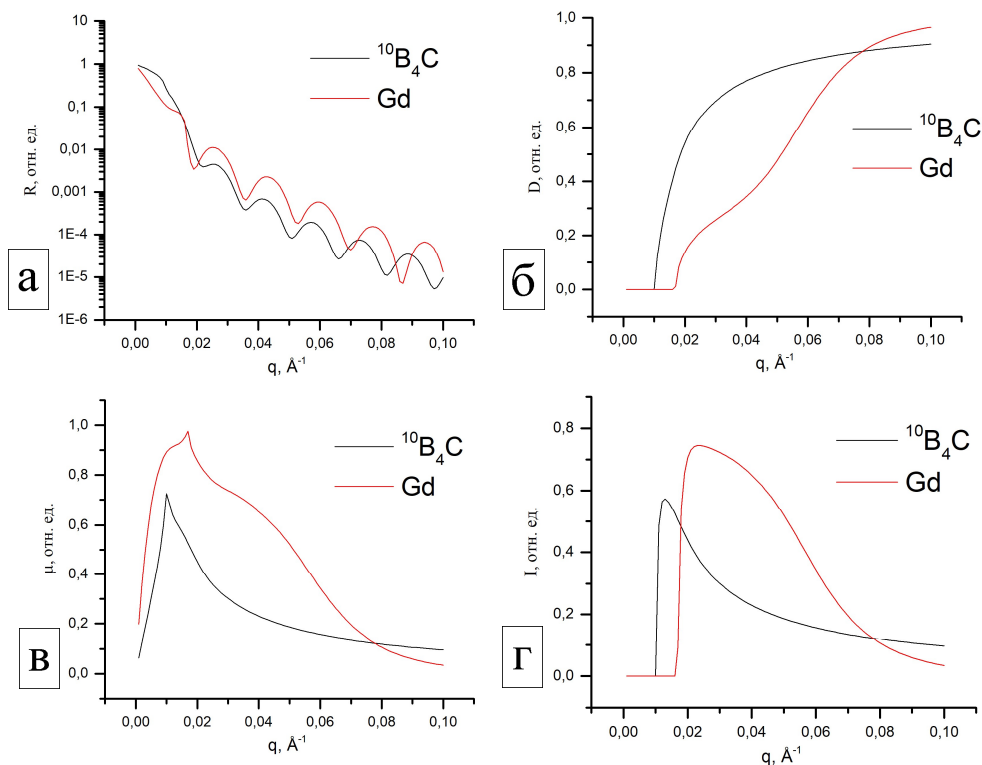


Рисунок 2.1.21.3. Процессы распространения нейтронов в системах с сильнопоглощающими слоями. Пояснения см. в тексте

Критический угол расположен примерно на $q = 0.015 \text{ \AA}^{-1}$. Отражение в случае обеих систем ведёт себя схожим образом, значимых особенностей нет. Выраженной области полного внешнего отражения нет, спад интенсивности до критического угла обусловлен практически полным поглощением нейтронов, проникающих внутрь образца. У системы с Gd в этой области наблюдается слабый минимум, обусловленный нелинейной зависимостью плотности длины рассеяния от энергии нейтронов [2.1.21.6].

В области значений q до критического угла коэффициенты прохождения D с хорошей точностью равны нулю. Это суммарный эффект полного внешнего отражения (очень мало нейтронов проникает внутрь образца) и сильного поглощения (эти немногие нейтроны поглощаются внутри образца и не выходят из него). Когда начинается проникновение нейтронов в рассматриваемую систему, коэффициент прохождения начинает быстро расти и при больших q асимптотически стремиться к единице. В случае системы с гадолинием поведение D качественно отличается от системы с карбидом бора. В диапазоне $0.02 \leq q \leq 0.08 \text{ \AA}^{-1}$ зависимость $D(q)$ может быть аппроксимирована линейной функцией.

Коэффициент поглощения растёт по мере уменьшения энергии нейтронов, поскольку при этом возрастает сечение взаимодействия. Резонансные эффекты в Gd существенно изменяют характер этой зависимости по сравнению с карбидом бора, где резонансов нет. Коэффициент поглощения для системы с Gd существенно выше в интервале $0.02 \leq q \leq 0.08$ и тоже может быть приближённо описан линейной функцией. В малых q коэффициент поглощения резко падает, что объясняется слабым проникновением нейтронов в образец в области полного внешнего отражения. В больших q поглощение асимптотически стремится к нулю вследствие уменьшения сечения взаимодействия, при этом коэффициент поглощения выше уже для $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

Интенсивность вторичного излучения в области после критического угла практически повторяет ход коэффициента поглощения. При этом, в малых q она скачком падает до нуля. Связано это, опять же, с тем, что ниже критического угла нейтроны в образец практически не проникают, соответственно, не происходит их поглощения и генерации излучения.

Поведение интенсивности вторичного излучения определяется тем, что она пропорциональна плотности вероятности обнаружения нейтрона $|\psi(q, z)|^2$ с энергией q на глубине z внутри образца. Вид этой функции для системы $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Gd}(400 \text{ \AA})$ приведён на рис. 2.1.21.4. Хорошо видна область до критического угла, когда плотность вероятности практически равна нулю на любой глубине. Затем начинается проникновение нейтронов в образец, и плотность испытывает скачок. Чем меньше глубина – тем выше этот скачок, потому что на малых глубинах велика интенсивность как проходящего, так и отражённого лучей. На больших глубинах становится значительным поглощение, и плотность нейтронов там существенно ниже. По мере

роста энергии нейтронов все эти перепады выравниваются, и плотность становится почти постоянной функцией, слабо осциллирующей вблизи единицы.

По этой причине график зависимости интенсивности вторичного излучения от энергии первичного пучка распадается на три области. До критического угла плотность близка к нулю и генерации излучения нет. Вдали от критического угла плотность почти равна единице и генерация полностью определяется поведением коэффициента поглощения. Вблизи критического угла интенсивность испытывает скачок, в этой области на неё оказывают влияние как плотность вероятности обнаружения нейтрона, так и коэффициент поглощения.

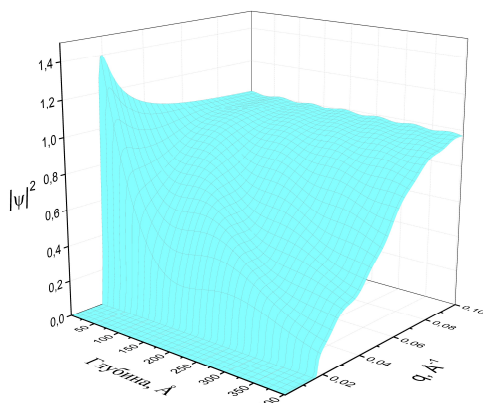


Рисунок 2.1.21.4. Плотность вероятности обнаружения нейтрона $|\psi(q, z)|^2$ в системе $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Gd}(400 \text{ \AA})$. Глубина отсчитывается от поверхности плёнки, на которую падает первичный пучок.

Для анализа зависимости процессов распространения нейтронов от толщины сильно поглощающего слоя рассмотрим системы $\text{Si}/\text{Nb}(10 \text{ \AA})/\text{Gd}(100 \text{ \AA})/\text{Nb}(10 \text{ \AA})$ и $\text{Si}/\text{Cr}(10 \text{ \AA})/\text{Gd}(50 \text{ \AA})/\text{Cr}(10 \text{ \AA})$. Зависимости для них приведены на рис. 2.1.21.5. Также, для сравнения, штриховыми линиями приведены соответствующие кривые для системы $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Gd}(400 \text{ \AA})$. Различные подложки и наличие обкладок не оказывают существенного влияния на процессы поглощения и вторичного излучения, поскольку их свойства определяются только слоем гадолиния.

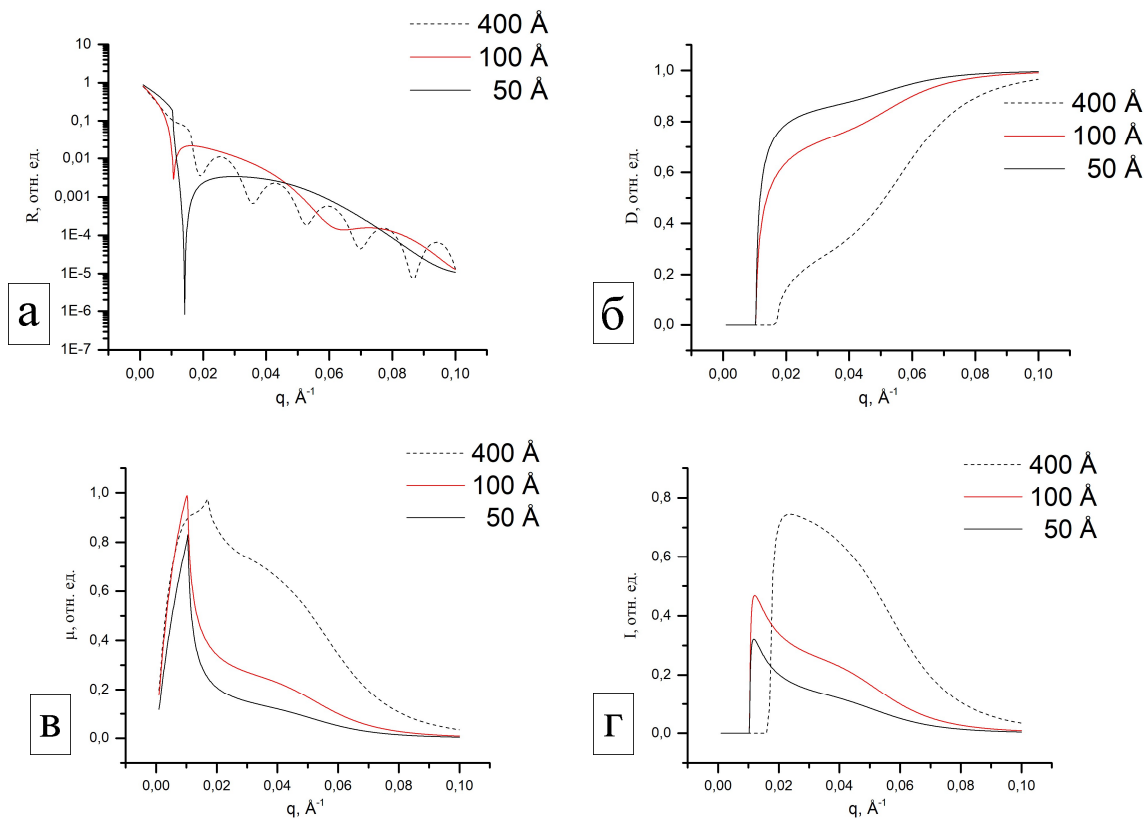


Рисунок 2.1.21.5. Процессы распространения нейтронов в системах $\text{Si}/\text{Nb}(10 \text{ \AA})/\text{Gd}(100 \text{ \AA})/\text{Nb}(10 \text{ \AA})$ и $\text{Si}/\text{Cr}(10 \text{ \AA})/\text{Gd}(50 \text{ \AA})/\text{Cr}(10 \text{ \AA})$. Показаны: отражение (а), прохождение (б), коэффициент поглощения (в), интенсивность вторичного излучения (г)

На отражение (рис. 2.1.21.5 а) влияет заметным образом только толщина плёнки. Для более тонких слоёв осцилляции становятся слабовыраженными или исчезают совсем (точнее, становятся настолько длинными, что не укладываются в масштаб рисунка). Коэффициент прохождения (рис. 2.1.21.5 б) становится существенно больше во всём диапазоне, увеличивается и высота скачка вблизи критического угла. Коэффициент поглощения (рис. 2.1.21.5 в), соответственно, уменьшается, но при этом в малых q возникает хорошо выраженный, достаточно узкий пик поглощения. Его высота и полуширина падают с уменьшением толщины плёнки, при этом также значительно уменьшается «хвост» - участок при $q > 0.02 \text{ \AA}^{-1}$. Для образца Si//Cr(10 Å)/Gd(50 Å)/Cr(10 Å) пик поглощения наиболее выражен и достаточно высок, а «хвост» мал. Системы такого типа можно использовать для селективного поглощения нейтронов с большими длинами волн. Интенсивность вторичного излучения существенно падает с уменьшением толщины слоя гадолиния. Соотношение интенсивностей пика и «хвоста» практически не изменяется, в целом, кривая сохраняет форму. Смещение пика влево обусловлено меньшим потенциалом взаимодействия нейтронов с подложкой из кремния Si по сравнению с сапфиром Al_2O_3 .

Плотность вероятности обнаружения нейтрона в системах с тонкими поглощающими слоями представлены на рис. 2.1.21.6 (можно сравнить также с рис. 2.1.21.4). В малых q (больших длинах волн), но выше критического значения, плотность постоянна в непоглощающих слоях и испытывает спад в поглощающем (эти области хороши видны на рисунках). Чем толще слой – тем меньше будет плотность под ним. При увеличении энергии нейтронов плотность вероятности выходит на единицу тем быстрее, чем тоньше поглощающий слой в системе.

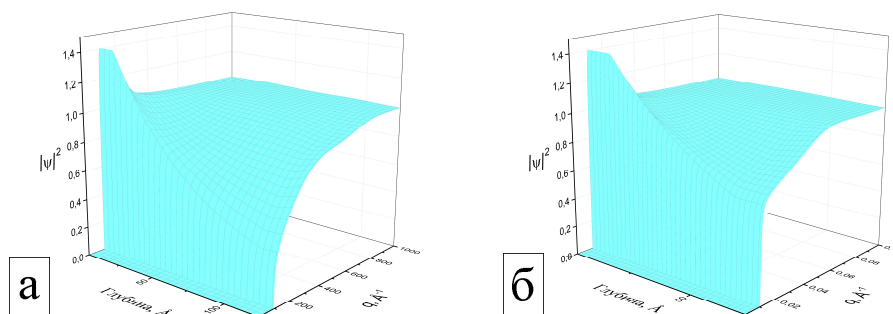


Рисунок 2.1.21.6. Плотность вероятности обнаружения нейтрона $|\psi(q, z)|^2$ в системах Si//Nb(10 Å)/Gd(100 Å)/Nb(10 Å) (а) и Si//Cr(10 Å)/Gd(50 Å)/Cr(10 Å) (б).

Рассмотрим более сложную систему, содержащую сильнопоглощающий слой – сверхрешётку Si//Cr(100 Å)/[Fe(80 Å)/Cr(10.5 Å)]₈/Cr(20 Å)/Gd(50 Å)/V(50 Å). Гадолиний здесь можно использовать также в качестве опорного слоя. Благодаря наличию резонансных эффектов и зависимости длины рассеяния гадолиния от энергии нейтронов, можно получить три различных картины отражения, если проводить эксперименты при трёх различных углах падения на времяпролётном рефлектометре (или при трёх различных длинах волн на монохроматическом). На рис. 2.1.21.7 показаны зависимости коэффициентов отражения для канала рассеяния «++» для углов падения 1, 5 и 10 мрад. Внешнее ведущее поле предполагается достаточно слабым, чтобы не нарушать исходное антиферромагнитное упорядочение образца. Магнитные моменты слоёв Fe повернуты под углами 90° и 270° относительно направления спинов нейтронов. В этом случае канал рассеяния «++» совпадает с каналом «--».

Для каналов рассеяния с переворотом спина «+-» и «-+» заметного эффекта от изменения угла падения не будет, поскольку они обусловлены только магнитным рассеянием, а от энергии нейтронов в гадолинии зависит ядерный потенциал взаимодействия. Поэтому рефлектометрические кривые с переворотом спина анализировать в представленном варианте метода опорного слоя нельзя.

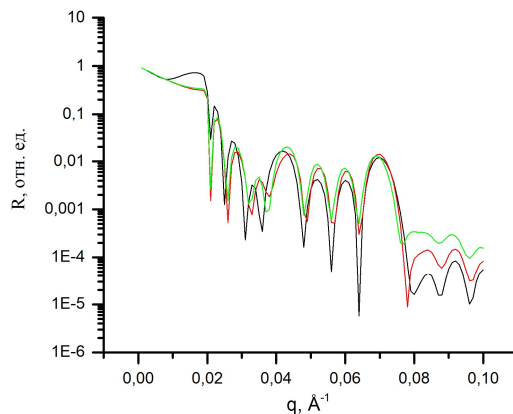


Рисунок 2.1.21.7. Коэффициент отражения для канала рассеяния «++» для углов падения 1 мрад (чёрный), 5 мрад (красный) и 10 мрад (зелёный).

На рис. 2.1.21.7 хорошо видно, что коэффициенты отражения, полученные при различных углах, отличаются друг от друга. Из анализа этих отличий можно вывести комплексный коэффициент отражения части образца, лежащей под опорным слоем, т.е. Si/Cr(100 Å)/[Fe(80 Å)/Cr(10.5 Å)]₈/Cr(20 Å). Опорный слой Gd(50 Å)/V(50 Å) при этом считается известным. Этого можно добиться, задавая параметры синтеза на данном этапе с более высокой точностью, либо определив характеристики опорного слоя из другого эксперимента, например, по рентгеновской рефлектометрии.

На рис. 2.1.21.8 показаны процессы распространения нейтронов в исследуемой системе для угла падения 1 мрад. На кривой отражения с переворотом спина R_{+-} хорошо виден интенсивный пик брэгговского отражения от магнитной подсистемы. Он приводит к заметному провалу коэффициента прохождения в этой области. Провал достаточно узкий, что позволяет использовать данный эффект для селективного подавления интенсивности нейтронов соответствующей энергии. Меняя период магнитной сверхрешётки, можно двигать положение провала, «настраивая» поглощение на желаемую энергию.

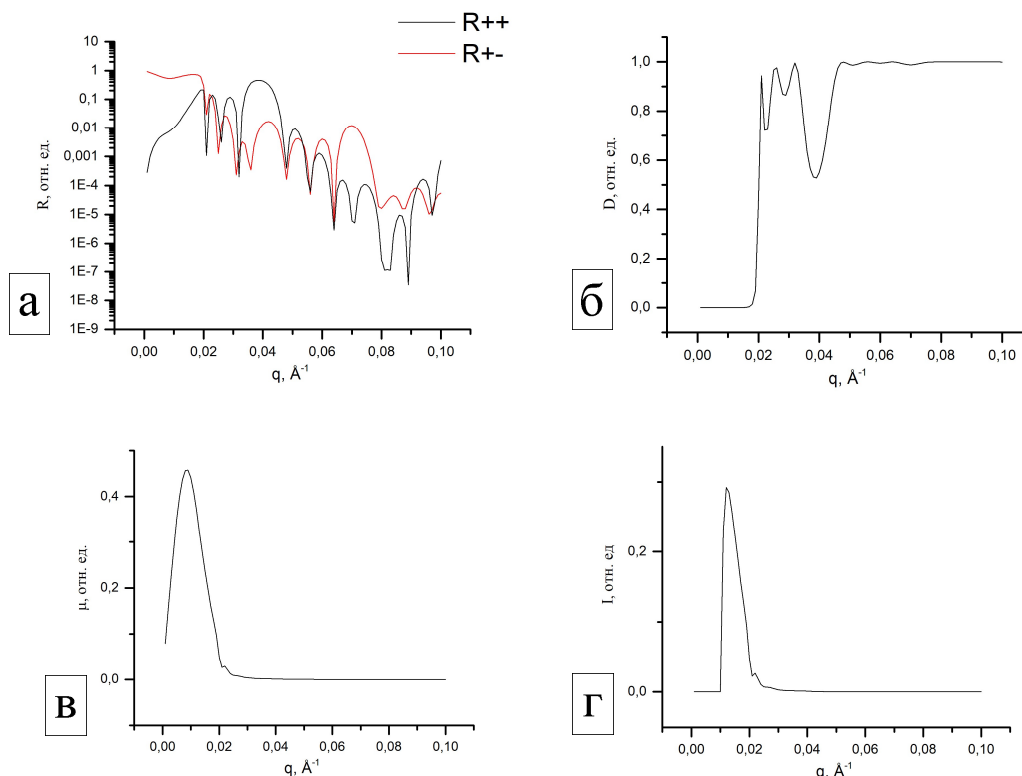


Рисунок 2.1.21.8. Процессы распространения нейтронов в системе Si/Cr(100 Å)/[Fe(80 Å)/Cr(10.5 Å)]₈/Cr(20 Å)/Gd(50 Å)/V(50 Å). Показаны: отражение (а), прохождение (б), коэффициент поглощения (в), интенсивность вторичного излучения (г)

Коэффициент поглощения имеет пик в малых q , а далее практически равен нулю. Это связано с тем, что, при угле падения 1 мрад, длины волн, которым соответствует максимум поглощения гадолиния оказываются заключены в узком диапазоне при малых значениях q . Аналогично ведёт себя интенсивность вторичного излучения – образуется острый пик при $q \approx 0.01 \text{ \AA}^{-1}$, затем быстрый спад и полное отсутствие вторичного излучения в больших q .

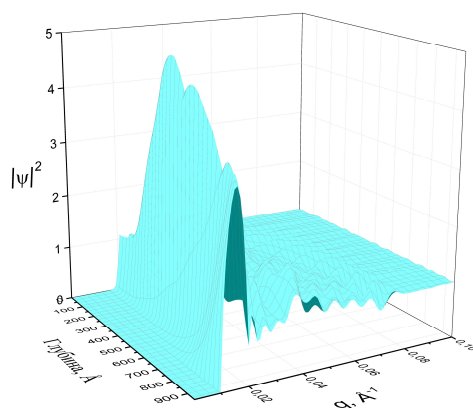


Рисунок 2.1.21.9. Модуль квадрата волновой функции нейтрона в зависимости от глубины и энергии для системы Si//Cr(100 Å)/[Fe(80 Å)/Cr(10.5 Å)]₈/Cr(20 Å)/Gd(50 Å)/V(50 Å). Отсчёт глубины ведётся от подложки.

На рис. 2.1.21.9 представлен модуль квадрата волновой функции нейтрона. Его поведение более сложно, чем для систем, рассмотренных ранее. Быстрый подъём в малых q связан с тем, что в этой области ещё достаточно велико отражение, в том числе с переворотом спина, при этом коэффициент прохождения тоже начинает быстро расти. При больших q коэффициент отражения падает, а коэффициент прохождения становится почти равным единице. Поэтому модуль испытывает быстрый спад и становится осциллирующей функцией вблизи единицы. При $q \approx 0.04 \text{ \AA}^{-1}$ видна сильная осцилляция, которая соответствует магнитному брэгговскому рефлексу.

В области первичного подъёма, при движении к подложке, плотность вероятности обнаружения нейтронов возрастает, кроме того, образуются минимумы и максимумы. По-видимому, это свидетельствует о существовании стоячих нейтронных волн, образовавшихся в результате многократных отражений в той части системы, где расположена сверхрешётка.

В настоящей работе проведено теоретическое исследование особенностей распространения нейтронов в многослойных системах с сильнопоглощающими слоями (гадолиний или карбид бора). Предложен эффективный подход для расчёта коэффициентов отражения, прохождения и поглощения, в том числе и поляризованных нейтронов. Показано, что анализ минимумов в области полного внешнего отражения позволяет определить плотность длины рассеяния сильнопоглощающих изотопов и её зависимость от энергии нейтронов. Написаны программы для ЭВМ, реализующие предложенные алгоритмы, они апробированы на модельных численных экспериментах. Наличие глубоких узких минимумов на полном внешнем отражении даёт возможность применять такие многослойные системы для реализации селективного поглощения низкоэнергетических нейтронов. Визуализация стоячей волны даёт возможность подбирать оптимальные для поставленной задачи ширину потенциальной ямы, положение и толщину сильнопоглощающего слоя. Это может быть полезно при расчёте реальных устройств – твёрдотельных детекторов и нейтронных волноводов. Все полученные теоретические результаты могут быть проверены экспериментально.

Выполненные работы и полученные в ходе их выполнения результаты полностью соответствуют Техническому заданию и Плану-графику работ, выполняемых в рамках реализации исследовательской программы (проекта) (Приложение № 8 к Соглашению о предоставлении субсидии от 13 октября 2021 г. № 075-10-2021-115). Исследования были выполнены молодыми учеными ИФМ УрО РАН в возрасте до 39 лет Ю.А. Саламатовым и Е.С. Никовой.

В ЛНФ в Научно-экспериментальном отделе комплекса спектрометров (НЭОКС) ИБР-2 в рамках исследовательской программы по теме: “Разработка и создание современных экспериментальных станций источников импульсного или постоянного типа” были проведены исследования конвертера на основе изотопа ^{157}Gd , который обладает наибольшим среди всех ядер сечением поглощения тепловых нейтронов. Реакция взаимодействия нейтронов с изотопом ^{157}Gd представлена ниже:



Исследуемый образец представляет собой алюминиевую подложку в виде диска диаметром 5 см с нанесённой слоистой структурой. Образец изготовлен в ИФМ УрО РАН, Рисунок 2.1.21.10.

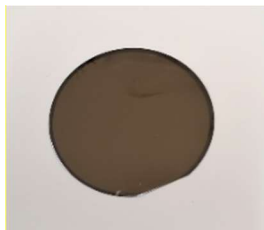


Рисунок 2.1.21.10. Пластина с нанесённым слоем ^{157}Gd на алюминиевой подложке.

Для изучения структуры образца было проведено измерение на рентгеновском дифрактометре EMPYREAN (PANalytical) в ЛНФ. Анализ полученной рефлектометрической кривой (Рисунок 2.1.21.11) показал, что структура образована тремя слоями – слой Nb толщиной 9.9 нм и плотностью 8.57 г/см³, слой Gd толщиной 1243.75 нм и плотностью 9.47 г/см³, слой Nb толщиной 8.1 нм и плотностью 8.57 г/см³.

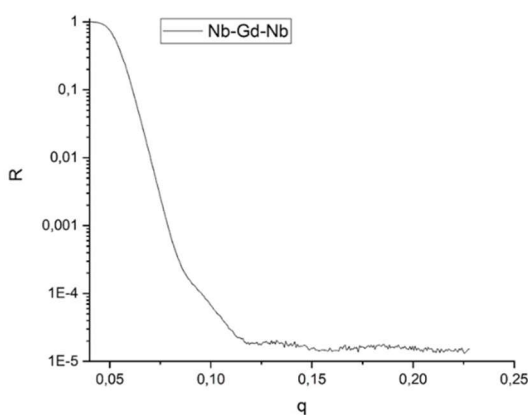


Рисунок 2.1.21.11. Рефлектометрическая кривая Gd.

На HPGe спектрометре Canberra был измерен спектр характеристического гамма-излучения для ^{157}Gd , Рисунок 2.1.21.12. В процессе измерения конвертер облучался гамма-квантами и нейтронами от источника ^{252}Cf после замедления в полиэтилене. Для подавления фона, обусловленного гамма-квантами ^{252}Cf , между источником и кристаллом детектора был размещен свинец. В спектре до 14 МэВ был найден только один пик ($E=181.9\text{keV}$), который соответствует характеристическому излучению гадолиния.

Первое измерение было проведено с ^{252}Cf для определения спектра гамма-квантов источника, второе измерение было проведено с пластиной ^{157}Gd . В силу того, что активность дочерних продуктов распада (ДПР) ^{252}Cf увеличивается со временем, вычитание результатов первого измерения из результатов второго не позволило полностью подавить пики ДПР ^{252}Cf . Поэтому регистрация нейтронов по характеристическому гамма-излучению ^{157}Gd затруднена.

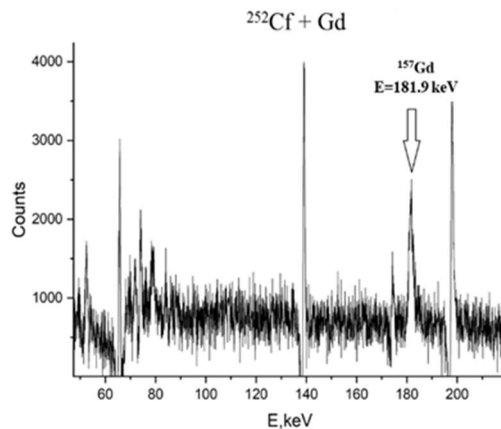


Рисунок 2.1.21.12. Измеренный спектр гамма-квантов для ^{157}Gd .

Для проведения измерений был использован многопроволочный детектор тепловых нейтронов на основе B_4C (2.1.3 Изготовление и испытания газового детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B_4C на алюминиевой подложке). В детектор вместо пластины с B_4C поместили пластину с нанесенным слоем Gd . Детектор заполнили газовой смесью $\text{Ar}/\text{CO}_2(90/10\%)$ до рабочего давления 2 бар. Для уменьшения гамма-фона детектор со всех сторон окружили свинцом.

Для данной пленки-конвертера было необходимо провести измерение амплитудного спектра сигналов, обусловленных потерей энергии продуктов реакции-конвертации тепловых нейтронов ^{157}Gd в газовом промежутке. Продуктами реакции конвертации тепловых нейтронов на ^{157}Gd являются электроны и гамма-кванты.

Было проведено несколько измерений амплитудного спектра:

- №1 – спектр источника ^{252}Cf без конвертера ^{157}Gd в детекторе,
- №2 – спектр без источника ^{252}Cf с конвертером ^{157}Gd в детекторе,
- №3 – спектр с источником ^{252}Cf и с конвертером ^{157}Gd в детекторе.

При измерениях амплитудных спектров для подавления гамма фона от источника ^{252}Cf использовался свинцовый фильтр. На Рисунке 2.1.21.13. а) черным цветом показан спектр, полученный при измерении №3, в котором пластина Gd облучалась термализованными нейтронами от ^{252}Cf . Синий спектр — измерение спектра от источника ^{252}Cf без Gd (№1). Розовая гистограмма — измерения Gd без источника ^{252}Cf (№2). На Рисунке 2.1.21.13. б) красная гистограмма — сумма синей и розовой гистограмм.

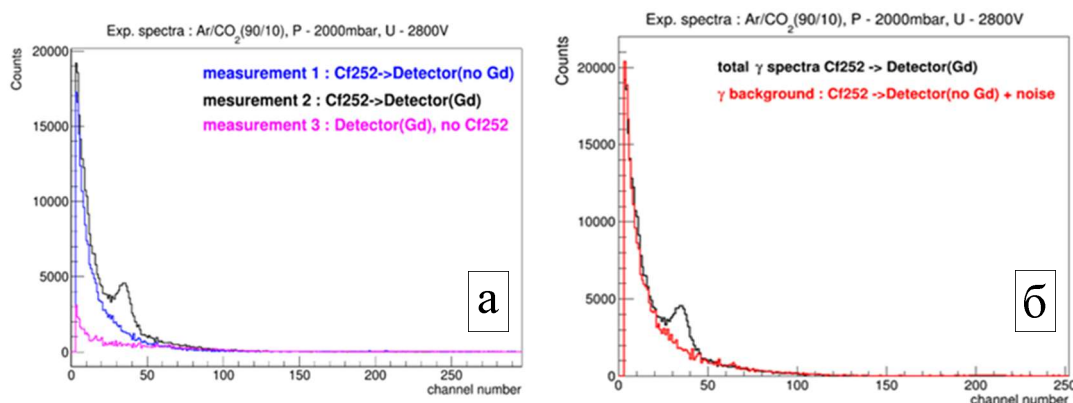


Рисунок 2.1.21.13. Амплитудные спектры а) Черный спектр - $^{252}\text{Cf} + ^{157}\text{Gd}$; Синий спектр - ^{252}Cf без ^{157}Gd ; Розовый спектр - измерения ^{157}Gd без источника ^{252}Cf и б) красная гистограмма - сумма спектров от источника ^{252}Cf без ^{157}Gd и ^{157}Gd без источника ^{252}Cf .

Результаты измерений показали, что возможна регистрация нейтронов с конвертером на основе ^{157}Gd . Проведенные измерения являются предварительными и указывают на необходимость оптимизации детектора и дальнейших исследования в этом направлении. А именно увеличение толщины стенок детектора для работы при высоких давлениях газовой смеси, использование источников гамма квантов с определенной

энергией для калибровки спектра, использование фильтра отсекающего конверсионные электроны внутри детектора, и т.д. Это поможет увеличить эффективность регистрации продуктов реакции $n + {}^{157}\text{Gd}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 2.1.21.1** Никова Е. С., Саламатов Ю. А., Кравцов Е. А. и др. Экспериментальная апробация метода опорного слоя в резонансной нейтронной рефлектометрии. *Физика металлов и металловедение*. 2019. Т. 120. С. 913-919.
- 2.1.21.2** Жакетов В. Д., Храдко К., Петренко А. В. и др. Рефлектометр поляризованных нейтронов с регистрацией нейтронов и гамма-квантов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021. № 6. С. 10-24.
- 2.1.21.3** Саламатов Ю. А., Кравцов Е. А. Применение метода фазово-амплитудных функций в рентгеновской и нейтронной рефлектометрии. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021. № 5. С. 3-12.
- 2.1.21.4** Parratt L.G. Surface Studies of Solids by Total Reflection of X-Rays. *Phys Rev*. 1954. V. 95. № 2. P. 359-369.
- 2.1.21.5** Abeles F. Recherches sur la propagation des ondes électromagnétiques sinusoïdales dans les milieux stratifiés. *Annales de Physique*. 1950. T. 12. № 5. P. 596-640.
- 2.1.21.6** Lynn J.E., Seeger P.A. Resonance effects in neutron scattering lengths of rare-earth nuclides. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. 1990. V. 44. P. 191-207.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Научный отчет (Теоретическое исследование отражения нейтронов в рефлектометрическом режиме и генерации вторичного излучения от многослойных наноструктур, содержащих сильнопоглощающие изотопы гадолиния и бора). ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.21_Научный отчет \(Теоретическое исследование отражения нейтронов в рефлектометрическом режиме и генерации вторичного излучения\).pdf](#)

2.1.22 Нейтронные рефлектометрические исследования многослойных наноструктур на основе MgO. (Совместно с ИФМ УО РАН)

На первом этапе выполнения проекта была синтезирована серия многослойных тонких пленок Fe/MgO/Fe и Fe/MgO/Cr/MgO/Fe, отличающихся толщиной слоев Fe, Cr и MgO. Образцы были синтезированы методом высоковакуумного магнетронного распыления на постоянном токе на установке MPS-4000-C6 фирмы ULVAC (Япония).

В качестве подложки использовались пластины монокристаллического MgO (100) толщиной 0.5 мм и размером $25 \times 25 \text{ мм}^2$. Была поставлена задача определения параметров магнетронного распыления (время напыления) удовлетворяющих выше приведенным требованиям к кристаллической структуре отдельных слоев (наличие и качество кристаллической структуры контролировалось с помощью рентгеновской дифрактометрии). Также было необходимо получить образцы с достаточно малым значением величины среднеквадратичной межслойной шероховатости (определялось методом рентгеновской рефлектометрии).

Рост наноструктур происходил при температуре подложки 100°C , фиксированном давлении аргона в камере напыления металлов 0.1 Па, в камере роста MgO 1.1 Па и мощности магнетронов 100 Вт. Базовое давление остаточных газов в камере напыления металлов было $P = 6 \times 10^{-7}$ Па, в камере роста MgO $P = 10^{-6}$ Па. Установлено, что отжиг структуры в процессе синтеза приводит к существенному улучшению структурных свойств и формированию многослойных тонких плёнок с более высокими структурными качествами и, как следствие, с возможностью их использования в более широком диапазоне областей применения. Как известно, отжиг влияет на величину коэффициента туннельного магнетосопротивления, который растет с увеличением температуры отжига [2.1.22.1, 2.1.22.2]. Температура отжига при синтезе исследуемых структур составляла $180\text{--}425^\circ\text{C}$, время отжига равнялось одному часу. Скорость напыления каждого материала определялась с помощью оптического профилометра Zygo New View 7300 по известному времени напыления и измеренной на профилометре высоте “ступеньки”. Дальнейшие исследования были проведены подробно на двух образцах: Fe(20 нм)/MgO(n нм)/Fe(5 нм)/Ta(5 нм), $n = 1.5 \text{ нм}$ (далее образец 1) и $n = 2.5 \text{ нм}$ (далее образец 2).

Для синтеза конечных образцов использовались следующие характеристики магнетронного распыления - мощность магнетронного распыления 100 Ватт, остаточное давление газов в камере напыления

перед запуском аргона – $5 \cdot 10^{-7}$ Па, давление аргона (чистота аргона – 99,9998 %) – 0.1 Па (во время напыления), частота вращения подложки – 10 об./мин.

Исследуемые образцы напылялись без какого-либо буферного слоя. Для защиты от окисления готовые структуры покрывались слоем Ta толщиной 5 нм. К слоям MgO в процессе роста была применена специальная процедура отжига [2.1.22.3]. Данная манипуляция была проведена с целью улучшения качества слоистой и кристаллической структуры MgO. Согласно предыдущим исследованиям, отжиг во время роста положительно влияет на формирование кристаллической структуры MgO [2.1.22.4]. Дальнейшие исследования были проведены подробно на двух образцах: Fe(10 нм)/MgO(1.5 нм)/Cr(t)/MgO(1.5 нм)/Fe(7 нм)/Ta(5 нм), $t = 0.9$ нм (далее образец 3) и $t = 1.8$ нм (далее образец 4).

Структурную характеристику исследуемых образцов осуществляли методами рентгеновской рефлектометрии высокого разрешения и рентгеновской дифрактометрии. Рентгеновские измерения были выполнены на дифрактометре Empyrean PANalytical с использованием Co и Cu K α -излучения в геометрии параллельного пучка. Параллельный пучок сформирован с помощью рентгеновского зеркала W/Si, установленного на первичном пучке, плоскопараллельного коллиматора и плоского графитового монохроматора, установленных на вторичном пучке. Щель для падающего луча составляла 0.05 мм, для дифрагированного луча – 0.1 мм.

Анализ рентгеновских данных проводили с помощью коммерческих программ PANalytical X'Pert Reflectometry и X'Pert Epitaxy. Магнитные свойства образцов исследовали методом вибрационной магнетометрии. Профили плотности намагниченности с послыйным разрешением были определены методом рефлектометрии поляризованных нейтронов [2.1.22.5] на установках:

1. NREX исследовательского реактора FRM2 (Мюнхен, Германия). Нейтронные измерения проводили при фиксированной длине волны нейтронов 0.43 нм. Поляризация падающего пучка $P_p > 99.99\%$. Анализ поляризации пучка после рассеяния проводили с помощью анализатора поляризации с эффективностью $P_a = 99.1\%$.
2. Нейтронном рефлектометре REFLEX, работающем на базе реактора ИБР-2М в ЛНФ ОИЯИ (г. Дубна).

Все вышеперечисленные измерения были выполнены при комнатной температуре. При исследовании ориентационной зависимости намагниченности (проводилось только для образцов 1 и 2) менялся угол между направлением поля, приложенного в плоскости пленки, и осью легкого намагничивания образца. Ось легкого намагничивания в данном случае лежит в плоскости пленки и направлена вдоль диагонали квадратного образца.

Толщины слоев Fe, Cr и MgO в образцах были подобраны нами методом «проб и ошибок» с тем, чтобы обеспечить наилучший баланс между качеством межслойных границ (контролируется с помощью рентгеновской рефлектометрии) и внутрислойной кристаллической структурой (контролируется с помощью рентгеновской дифракции высокого разрешения).

В таблице 2.1.22.1. представлены композиция и номинальные толщины слоев, образующих синтезированные многослойные тонкие пленки.

№ образца	Формула образца
1	MgO/Fe(20 нм)/MgO(2.5 нм)/Fe(5 нм)/Ta(5 нм)
2	MgO/Fe(20 нм)/MgO(1.5 нм)/Fe(5 нм)/Ta(5 нм)
3	MgO/Fe(10 нм)/MgO(1.5 нм)/Cr(0.9 нм)/MgO(1.5 нм)/Fe(7 нм)/Ta(5 нм)
4	MgO/Fe(10 нм)/MgO(1.5 нм)/Cr(1.8 нм)/MgO(1.5 нм)/Fe(7 нм)/Ta(5 нм)

Таблица 2.1.22.1. Список исследуемых синтезированных многослойных тонких пленок Fe/MgO/Fe и Fe/MgO/Cr/MgO/Fe

На рисунках 2.1.22.1 – 2.1.22.4 представлены рефлектограммы (черные символы) вместе с результатом фитирования (красная линия), измеренные на излучении Cu от образцов № 1 - 4 соответственно. Из приведенных ниже обработанных рефлектограмм нами были определены толщины отдельных слоев, образующих многослойные тонкие пленки, а также плотности материалов и среднеквадратичные шероховатости межслойных границ. Все полученные параметры приведены ниже в таблице 2.1.22.2.

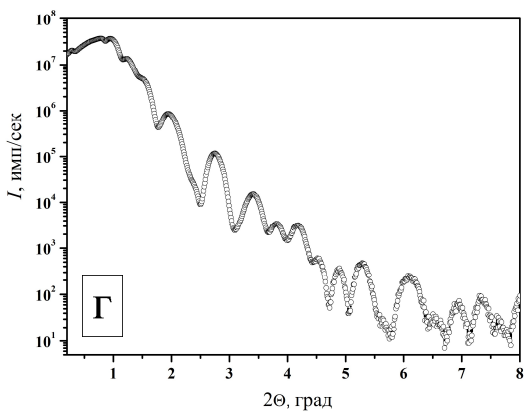
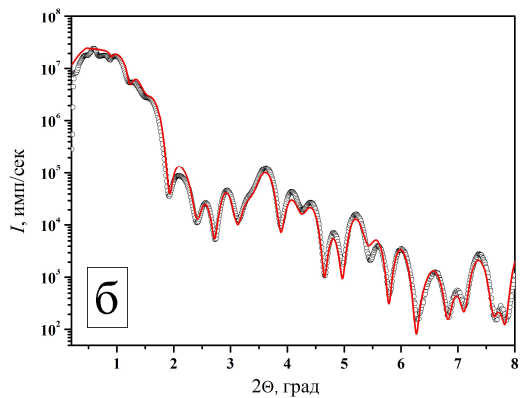
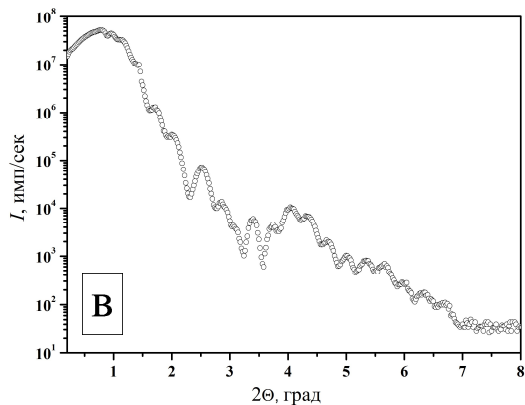
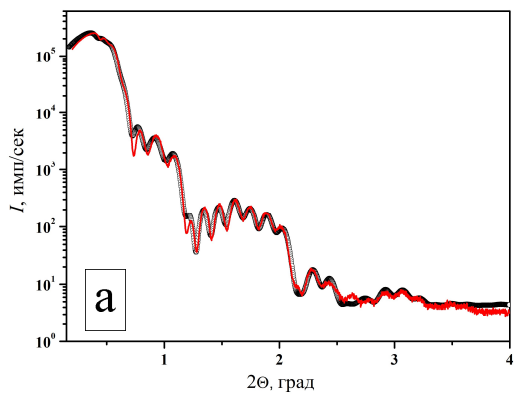


Рисунок 2.1.22.1. а) Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 1 (линия из черных символов) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия); б) экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 2, измеренная при излучении Cu . Данные находятся в процессе обработки; в) экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 3 (линия из черных символов) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия); г) экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 4, измеренная при излучении Cu . Данные находятся в процессе обработки.

Образец №	Материал слоя	Толщина слоя, нм	Межслойная шероховатость, нм	Плотность, г/см ³
1	Fe	18.8	0.5	9
	MgO	2.8	0.3	4.5
	Fe	4.4	0.4	9
	Ta	3.8	0.4	17.8
	Ta ₂ O ₅	2.6	0.4	8.3
3	Fe	9.4	0.2	9.3
	MgO	1.7	0.2	4.2
	Cr	0.6	0.3	7.8
	MgO	2.4	0.1	1.8
	Fe	6.3	0.3	7.4
	Ta	4.4	0.2	18.4
	Ta ₂ O ₅	24	0.2	7.8

Таблица 2.1.22.2. Структурные параметры образцов 1 и 3, полученные после обработки данных рентгеновской рефлектометрии.

Для решения задачи по структурной характеристике многослойных тонких пленок Fe/MgO/Fe и Fe/MgO/Cr/MgO/Fe были проведены измерения для определения их кристаллической структуры. Для этого были использованы рентгеновские методики дифрактометрии высокого разрешения. На рисунке 2.1.22.2, представлена кривая рентгеновской дифракции от образца № 1, измеренная вдоль направления роста образца. На дифрактограмме проиндексированы наблюдаемые рефлексы. Наблюдаются рефлексы Fe (002), MgO (002) и MgO (004). Вид данной дифрактограммы получился типичным для всех 4 исследованных образцов.

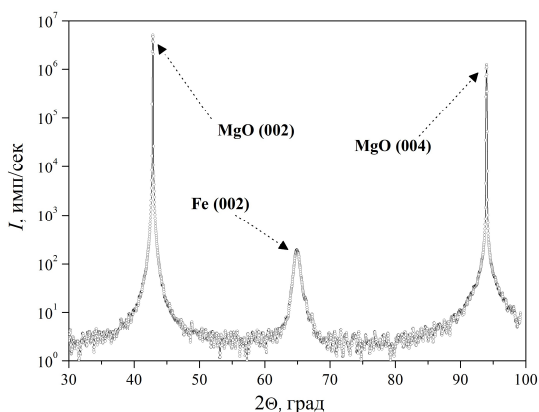


Рисунок 2.1.22.2. Дифрактограмма от образца №1, измеренная вдоль направления роста образца.

Кривые рентгеновской дифракции для образцов 2, 3 и 4 не приведены в отчете, так как являются абсолютно идентичными друг другу и полностью повторяют кривую на рисунке 2.1.22.2. Таким образом, анализ данных рентгеновских исследований позволяет сделать вывод, что в синтезированных многослойных тонких пленках Fe/MgO/Fe и Fe/MgO/Cr/MgO/Fe сформировалась слоистая структура с толщинами слоев, близкими к номинальным, а также достаточно небольшими величинами среднеквадратичных межслойных шероховатостей границ раздела.

Магнитные свойства многослойных тонких пленок Fe/MgO/Fe и Fe/MgO/Cr/MgO/Fe были исследованы с помощью лабораторного вибрационного магнитометра при комнатной температуре. При исследовании ориентационной зависимости намагниченности менялся угол между направлением поля, приложенного в плоскости пленки, и осью легкого намагничивания образца. Ось легкого намагничивания в данном случае лежит в плоскости пленки и направлена вдоль диагонали квадратного образца (рис. 2.1.22.3а).

На рис. 2.1.22.3 б) приведены кривые намагниченности, измеренные при приложении магнитного поля вдоль оси легкого намагничивания (синий), вдоль оси трудного намагничивания (красный) и поля, направленного под углом 22° относительно оси легкого намагничивания (черный). Ниже на рисунке 2.1.22.3 в) приведены аналогичные кривые намагниченности, измеренные для образца № 2. Угол, под которым

направлено магнитное поле относительно оси легкого намагничивания в данном случае имел два значения - 22° для образца № 1 и 30° – для образца № 2 соответственно. Анализ данных, полученных при измерении намагниченности, выявил необычное магнитное поведение, обусловленное конкуренцией зеемановского взаимодействия, межслойного обменного взаимодействия и магнитокристаллической анизотропии внутри слоев Fe.

Из полученных магнитометрических данных следует, что в исследуемых структурах слои Fe разных толщин перемагничиваются в разных полях, а это, как известно, является условием реализации эффекта ГТМС.

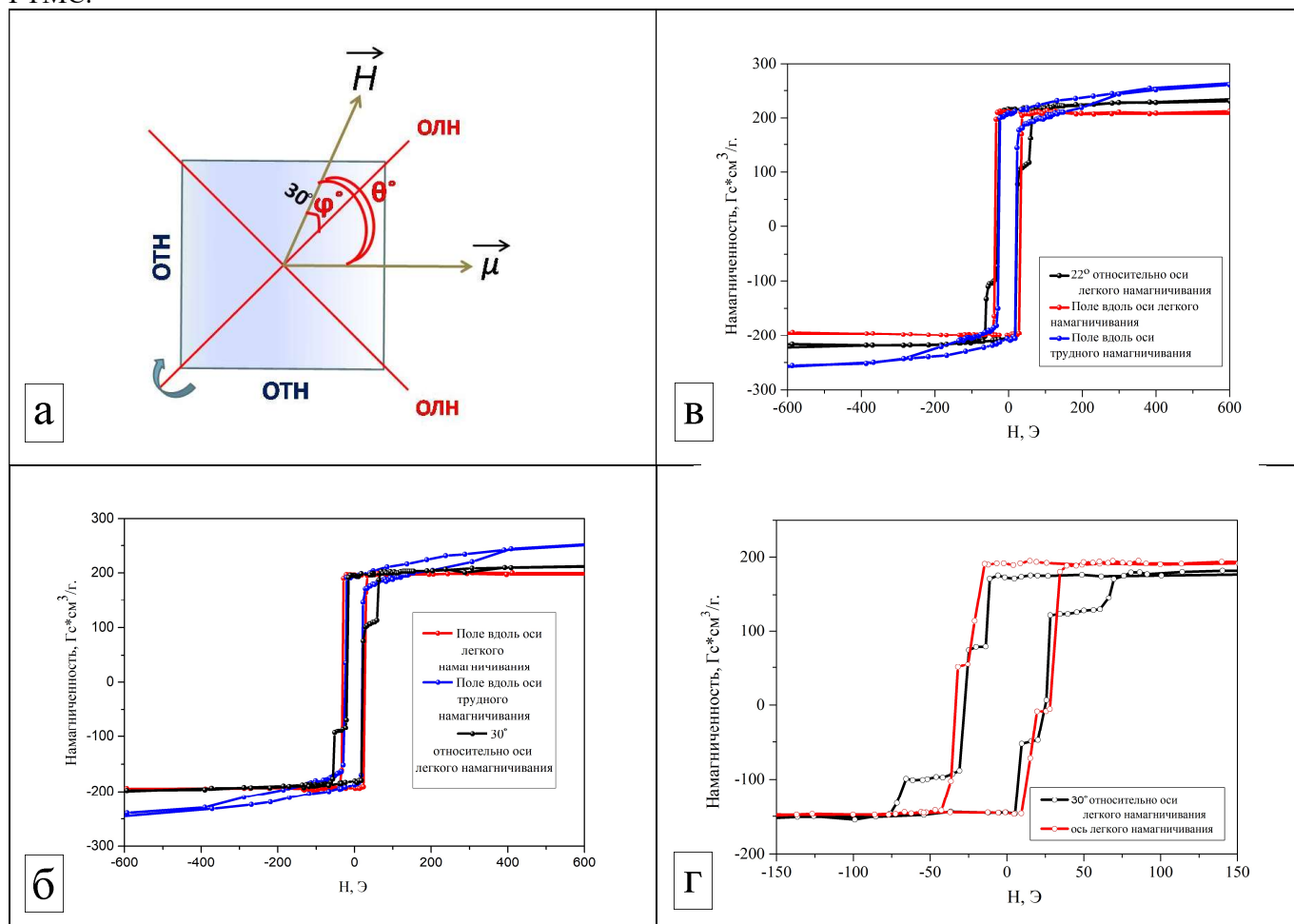


Рисунок 2.1.22.3. а) Схематическая иллюстрация измерения намагниченности. (ОТН и ОЛН ось трудного и легкого намагничивания соответственно) б) петли гистерезиса для образцов №1; в) петли гистерезиса для образцов № 2; г) петли гистерезиса образца № 3, измеренные для ориентаций внешнего магнитного поля относительно оси легкого намагничивания $[100]\text{Fe}$ при приложении магнитного поля под углом 30° (черный) и соответствующая положению образца, когда магнитное поле направлено вдоль оси легкого намагничивания (красный).

На рисунке 2.1.22.4 показаны 9 петель гистерезиса, соответствующие различному углу поворота образца № 3 в магнитном поле относительно оси легкого намагничивания (0° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° и 90° соответственно). Рисунок наглядно демонстрирует появление и постепенное увеличение характерного плато в области магнитных полей от 20 до 100 Э. Для образца № 2 данный процесс проявлялся аналогичным образом.

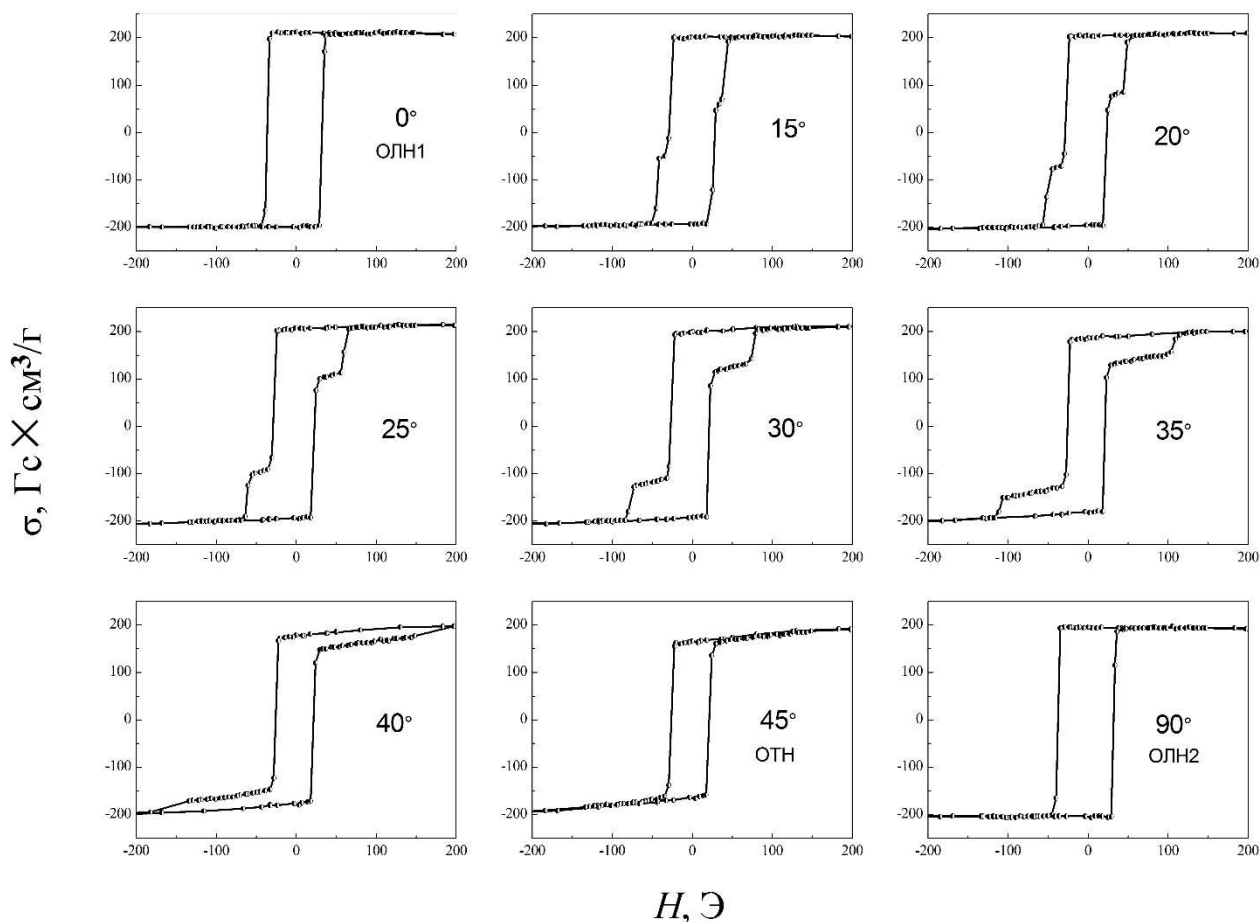


Рисунок 2.1.22.4. Петли гистерезиса для образца № 3, соответствующие различному положению образца относительно направления внешнего магнитного поля.

Образец № 4 при измерениях намагниченности проявлял аналогичные особенности. На приведенных графиках на рис. 2.1.22.4, можно заметить существенное отличие в форме петли образцов № 3 и № 4 (Fe/MgO/Cr/MgO/Fe) по отношению к образцам № 1 и № 2 (Fe/MgO/Fe). Кривые намагниченности образца № 3 имеют плато около значений магнитного поля $H = 15$ и 40 Э. Возможно, в этих полях магнитные моменты слоев Fe направлены вдоль оси легкого намагничивания, и неясно, происходит их когерентное вращение вместе или по отдельности. Такое поведение намагниченности наблюдалось в обоих образцах. Чтобы получить профили намагниченности с разрешением по глубине слоев при указанных значениях магнитного поля, были проведены эксперименты с поляризованными нейтронами.

На основе приведенных магнитометрических результатов можно сделать вывод о том, что нами успешно получена серия многослойных тонких пленок Fe/MgO/Fe и Fe/MgO/Cr/MgO/Fe , которые являются хорошими кандидатами для последующих исследований с помощью методов с использованием рефлектометрии поляризованных нейтронов.

Вывод о перемагничивании слоев Fe также подтверждается и результатами, полученными с использованием метода рефлектометрии поляризованных нейтронов. Чтобы получить профили намагниченности с разрешением по глубине слоев при указанных значениях магнитного поля, были проведены эксперименты с поляризованными нейтронами. На рисунках 2.1.22.5 а), б), в) представлены результаты измерений рефлектометрии поляризованных нейтронов для образца 2, рисунки 2.1.22.5 г), д), е), ж) соответствуют аналогичным данным, полученным для образца 1. Величина внешнего магнитного поля H во время измерений менялась от 30 до 206 Э, также стоит отметить, что поле прикладывали параллельно направлению $[100]$ подложки MgO. На рисунке 2.1.22.5 на данный момент приведены необработанные экспериментальные данные, обработка которых планируется в будущем.

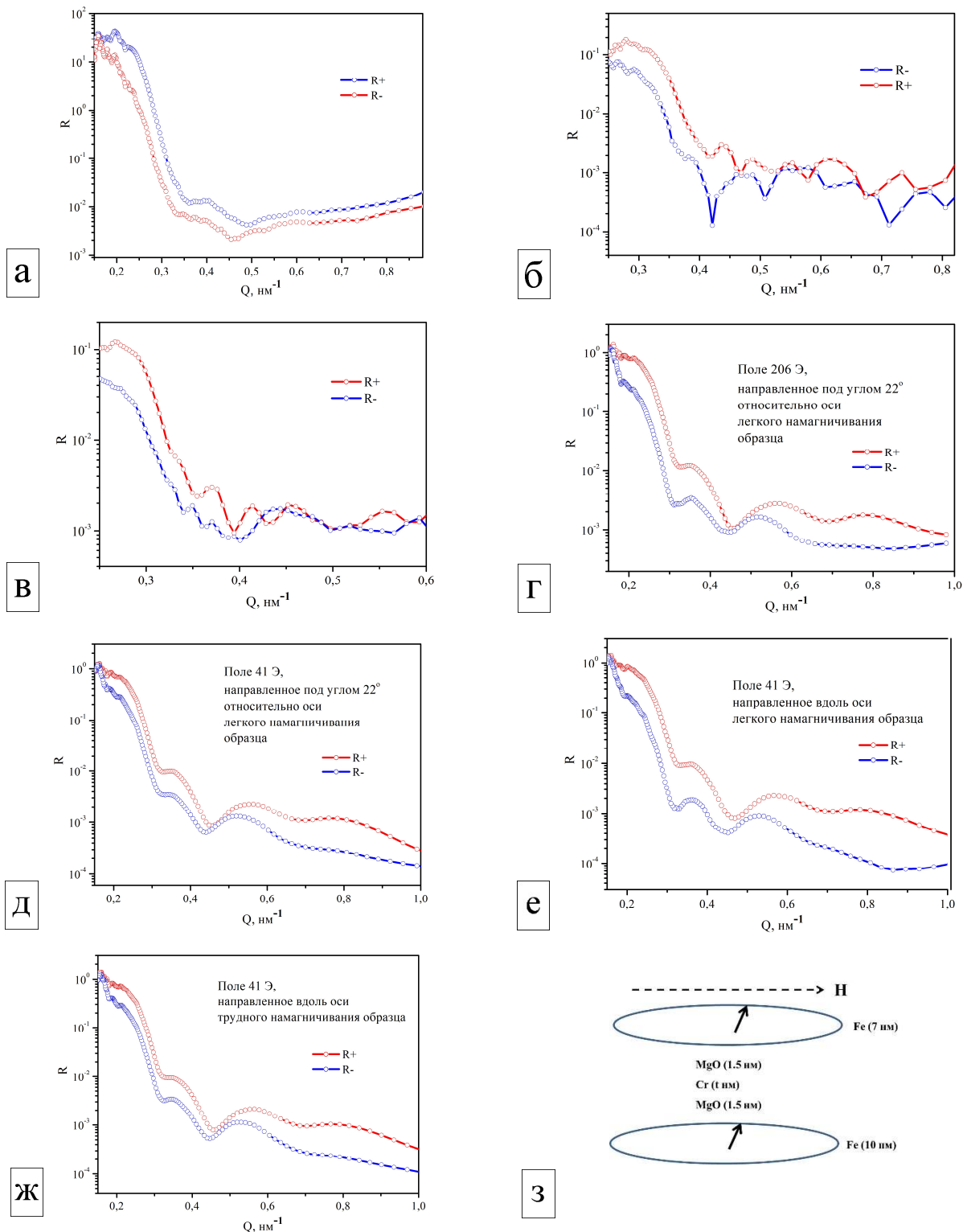


Рисунок 2.1.22.5. а) Коэффициенты отражения поляризованных нейтронов, измеренные в поле $H = 200$ Э, в зависимости от направления вектора рассеяния в образце №2 под углом 30° относительно оси легкого намагничивания; б) коэффициенты отражения поляризованных нейтронов, измеренные в поле $H = 45$ Э, в зависимости от направления вектора рассеяния в образце №2 под углом 30° относительно оси легкого намагничивания; в) коэффициенты отражения поляризованных нейтронов, измеренные в поле $H = 30$ Э, в зависимости от направления вектора рассеяния в образце №2 под углом 30° относительно оси легкого намагничивания; г) коэффициенты отражения поляризованных нейтронов, измеренные в поле $H = 206$ Э, в зависимости от направления вектора рассеяния в образце № 1, образец в положении под углом 22° к полю H относительно оси легкого намагничивания; д) коэффициенты отражения поляризованных нейтронов, измеренные в поле $H = 41$ Э, в зависимости от направления вектора рассеяния в образце № 1, образец в

положении под углом 22° к полю H относительно оси легкого намагничивания; е) коэффициенты отражения поляризованных нейтронов, измеренные в поле $H = 41$ Э, направленное вдоль оси легкого намагничивания образца, в зависимости от направления вектора рассеяния в образце № 1; ж) коэффициенты отражения поляризованных нейтронов, измеренные в поле $H = 41$ Э, направленное вдоль оси трудного намагничивания образца, в зависимости от направления вектора рассеяния в образце № 1; з) схема образцов № 3 и № 4, где t - толщина слоя Cr 0.9 и 1.8 нм соответственно).

На рисунке 2.1.22.6 представлены результаты измерений рефлектометрии поляризованных нейтронов для образца № 3 и № 4. Величина внешнего магнитного поля H во время данных измерений менялась от 15 до 40 Э после намагничивания в отрицательном поле $H = -4.5$ кЭ. Во время эксперимента поле прикладывали параллельно направлению $[100]$ подложки MgO. На приведенном выше рис. 2.1.22.5 з) схематически показано направление внешнего магнитного поля относительно исследуемого образца (пунктирная стрелка), а также сама его структура. Стрелками показано примерное направление магнитных моментов в слоях, определенное в результате подгонки экспериментальных данных к модели. На рисунке 2.1.22.6 в) изображены кривые спин-поляризованного отражения, измеренные при $H = 15$ Э. Кривые отражения без переворота спина R^{++} и R^{--} — характеризуются полным отражением ниже критического края с $Q_{\text{crit}} = 0.16 \text{ nm}^{-1}$ и интерференционными колебаниями выше Q_{crit} . Кривые разделены, что свидетельствует о наличии в образце одного магнитного момента, который коллинеарен H . Отметим, однако, что расщепление кривых при малых значениях Q , близких к Q_{crit} , довольно незначительно. В дополнение к кривым отражения без переворота спина в эксперименте наблюдается сильное рассеяние с переворотом спина с пиком при $Q = Q_{\text{crit}}$ с амплитудой порядка 20%. Наличие такого рассеяния говорит о том, что в системе существует неколлинеарный H магнитный момент. Экспериментальные данные были подогнаны к модельным кривым с использованием известного суперматричного подхода [2.1.22.6].

Некоторое различие между экспериментальными и теоретическими кривыми на рис. 2.1.22.6 б) в области малых значений коэффициента отражения объясняется значительным вкладом фона в этой области. При подгонке варьировали намагниченность слоев Fe (7 нм) и Fe (10 нм) (M_1 и M_2) и углы между векторами намагниченности и внешним полем (α_1 и α_2). Наилучшим образом подходят значения $\alpha_1 = 54^\circ$ и $\alpha_2 = 154^\circ$, чувствительность определения углов около 5° . Видно, что верхний слой железа уже перевернулся и соответствует положительной легкой оси $[110]$, а нижний все еще отвечает отрицательному направлению $[\bar{1}10]$. Комбинированные магнитные и нейтронографические измерения показали, что коллинеарные компоненты магнитных моментов слоев Fe выровнены и направлены антипараллельно друг другу, так что их сумма близка к нулю [2.1.22.7, 2.1.22.8]. Это объясняет относительно небольшую разницу кривых в случае отражения без переворота спина вблизи Q_{crit} . Эта разница значительно возрастает с увеличением поля до $H = 40$ Э (рис. 2.1.22.6 а и 2.1.22.6 б). Однако с увеличением магнитного поля рассеяние с переворотом спина практически не меняется. Количественно это удалось описать, перевернув нижний слой Fe в направлении положительной легкой оси $[110]$. Это не меняет неколлинеарный момент, но делает коллинеарные моменты параллельными. Кривые рефлектометрии поляризованных нейтронов образца 4 при $H = 15$ Э (рис. 2.1.22.6 г) аналогичны кривым образца 3, измеренным в том же поле, и могут быть описаны аналогичным магнитным состоянием. Кроме того, когда поле было увеличено до $H = 40$ Э, кривые отражения без переворота спина вели себя аналогично кривым образца 3: их расщепление увеличилось. Это означает, что коллинеарные компоненты ведут себя в образцах одинаково. Однако наблюдается сильная разница при рассеянии с переворотом спина. Пик сместился от Q_{crit} к более высокому значению $Q = 0.26 \text{ nm}^{-1}$, т. е. неколлинеарная конфигурация образца 4 при $H = 40$ Э отличается от образца 3. С помощью подгонки установлено, что верхний и нижний слои перевернуты в направлениях $[1\bar{1}0]$ и $[110]$ соответственно. Остальные данные были подогнаны аналогичным образом.

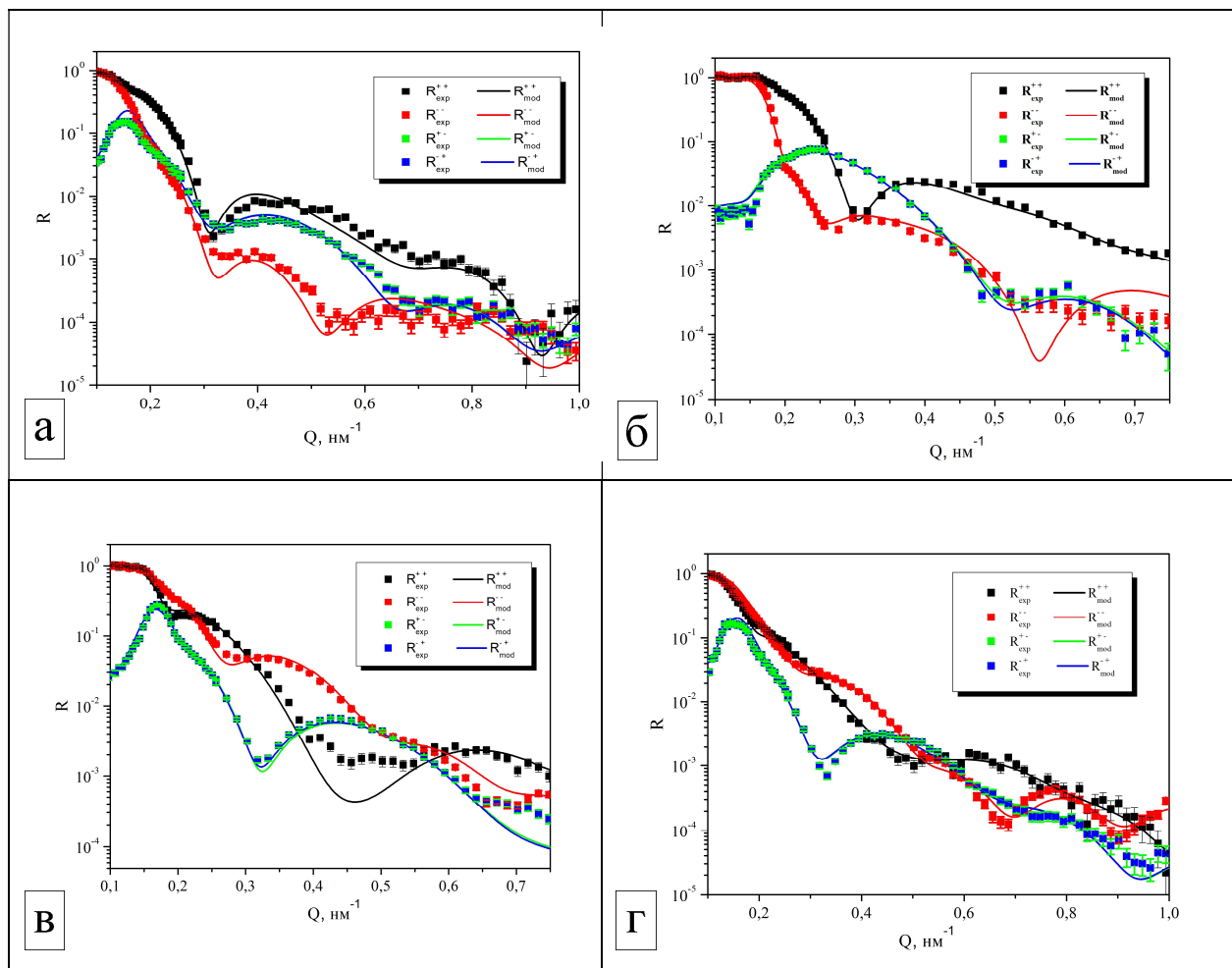


Рисунок 2.1.22.6. а) Экспериментальные кривые рефлектометрии поляризованных нейтронов (символы) и результат подгонки (линии) для образца 3, измеренные в магнитном поле 40 Э; б) Экспериментальные кривые рефлектометрии поляризованных нейтронов (символы) и результат подгонки (линии) для образца 4, измеренные в магнитном поле 40 Э; в) экспериментальные кривые рефлектометрии поляризованных нейтронов (символы) и результат подгонки (линии) для образца 3, измеренные в магнитном поле 15 Э; г) экспериментальные кривые рефлектометрии поляризованных нейтронов (символы) и результат подгонки (линии) для образца 4, измеренные в магнитном поле 15 Э.

Объектом исследования были планарные наноструктуры на основе MgO. Конкретными задачами исследования ставилось исследование отражения нейтронов в рефлектометрическом режиме от таких слоистых наноструктур.

Задачи второго этапа проекта полностью выполнены. Методом высоковакуумного магнетронного распыления синтезированы высококачественные планарные наноструктуры на основе MgO. Рентгеноструктурные исследования, проведенные с использованием методов рентгеновской рефлектометрии и дифрактометрии высокого разрешения, подтвердили высокое качество полученных образцов: строго выдержанная периодичность слоистой структуры, резкие межслойные границы. Магнитометрические исследования, проведенные с помощью вибрационной магнитометрии, обнаружили особенности магнитного поведения, которые могут быть связаны с влиянием магнитокристаллической анизотопии и формированием межслойного обменного упорядочения в наноструктурах. Проведенное исследование отражения нейтронов в рефлектометрическом режиме позволило определить возникающие в процессе намагничивания магнитные конфигурации с разрешением по слоям. Полученные результаты будут способствовать созданию новых материалов для детектирования нейтронов спинтроники на основе тонких пленок и наноструктур, содержащих сильнопоглощающие изотопы гадолиния.

Выполненные работы и полученные в ходе их выполнения результаты полностью соответствуют Техническому заданию и Плану-графику работ, выполняемых в рамках реализации исследовательской программы (проекта) (Приложение № 8 к Соглашению о предоставлении субсидии от 13 октября 2021 г. №

075-10-2021-115). Исследования были выполнены молодыми учеными ИФМ УрО РАН в возрасте до 39 лет Е.М. Якуниной, Д.И. Девятериковым, А.А. Рыжовой и И.С. Жидковым.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 2.1.22.1. Hayakawa J., Lee Y.M., Ikeda S. et al. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 232510.
- 2.1.22.2. Ikeda S., Hayakawa J., Lee Y.M. et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2007. V. 54. P. 991.
- 2.1.22.3. Yuasa S., Nagahama T., Fukushima A., et al. // Nature Mater. 2004. V. 3. P. 868.
- 2.1.22.4. Yuasa S., Djayaprawira D.D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 40. P. 337.
- 2.1.22.5. Клесанов Н.К., Аксельрод Л.А., Забенкин В.Н. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2008. № 11. С. 3.
- 2.1.22.6. A. R'uhm, B. Toperverg, H. Dosch. Phys. Rev. B 60, 23, 16073 (1999).
- 2.1.22.7. M'ynczak E., Freindl K., Spiridis N., Korecki J., J. Appl. Phys. 113, 2, 024320 (2013).
- 2.1.22.8. Jia X., Xia K., Bauer G.E.W. Phys. Rev. Lett. 107, 17, 176603 (2011).

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Научный отчет (Нейтронные рефлектометрические исследования многослойных наноструктур на основе MgO).
ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.22_Научный отчет \(Нейтронные рефлектометрические исследования многослойных наноструктур на основе MgO\).pdf](#)

2.1.23 Проведение экспериментальных исследований одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей. (Совместно с НИЦ КИ ПИЯФ)

В ходе работ по проекту на втором этапе были проведены экспериментальные исследования одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей в соответствии с разработанной программой и методиками испытаний прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей ОПЧД.01.00.00.00.000 ПМ.

Цель выполнения работы: провести экспериментальные исследования одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей. Результаты проведенных исследований планируется использовать для дальнейшего выполнения задач по проекту. Работа проведена согласно п. 2.1.23 ПГ и п. 3.2.7 ТЗ.

В ходе проведенных исследований была осуществлена проверка рабочих параметров экспериментального образца в соответствии с параметрами, обозначенными в ОПЧД.01.00.00.00.000 ПМ. В результате проведенных исследований было установлено, что объект испытания одномерный позиционно-чувствительный счетчик нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей, соответствует параметрам Программы и методики испытаний.

В ходе проведения измерений была получена зависимость амплитуды SiPM от координаты (рис. 2.1.23.1), на основании которой сделан следующий вывод: форма затухания фотонов в световоде имеет линейный характер и отслеживается зависимость амплитуды от координаты, которая описывается линейной функцией. Линейная форма зависимости, полученной из экспериментальных данных, позволяет судить о том, что на данной длине световода затухание не сильно выражено и позволяет предположить, что возможно увеличить длину детектора без сильной потери интенсивности. Разрешение по координате в образце испытаний примерно 10 мм.

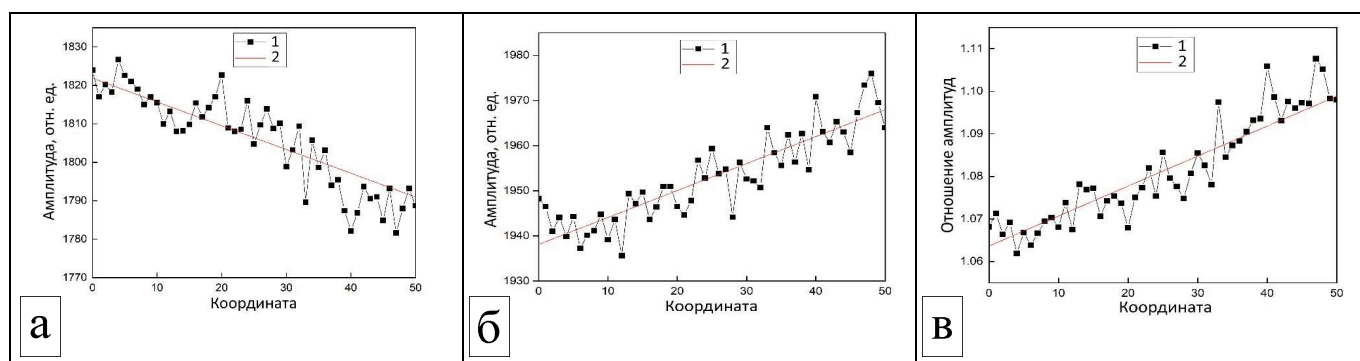


Рисунок 2.1.23.1. Зависимость амплитуды SiPM от координаты: (а) – средняя амплитуда с левого SiPM, (б) – средняя амплитуда с правого SiPM, (в) - отношение амплитуд: 1 – экспериментальные данные, 2 – аппроксимация.

Результаты проделанной работы по экспериментальным исследованиям представлены в документации: «Отчет о проведенных экспериментальных исследованиях одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF», входящей в состав Отчета 2 этапа к Договору № 539-100-1/2022 от 04 мая 2022 г. в рамках Соглашения № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Отчет о проведенных экспериментальных исследованиях одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.23_Отчет_о_проведенных_экспериментальных_исследованиях_одномерного_позиционно-чувствительного_счетчика_нейтронов_на_основе_сцинтилляторов_ZnS6LiF.pdf](#)

2.1.24 Изготовление кольцевого детектора нейтронов для дифрактометра «СФЕРА (часть 2): изготовление и сборка корпуса детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА». (Совместно с ИЯИ РАН)

В соответствии с эскизно документацией ЛНИ-Э.000 разработанной на первом этапе в рамках Соглашения №075-10-2021-115 от 13 октября 2021г. (ИГК 000000S507521RGN0002) по теме «Разработка и создание современных экспериментальных станций источников импульсного или постоянного типа» были изготовлены детали корпуса детекторной системы нейтронного «СФЕРА». На рисунке 2.1.24.1 показаны части деталей корпуса детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА».



Рисунок 2.1.24.1. Части деталей корпуса детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА».

Детали изготовлены из Композитных алюминиевых панелей толщиной 4,0 мм. На рисунке 2.1.24.2 показана структура композитных алюминиевых панелей.

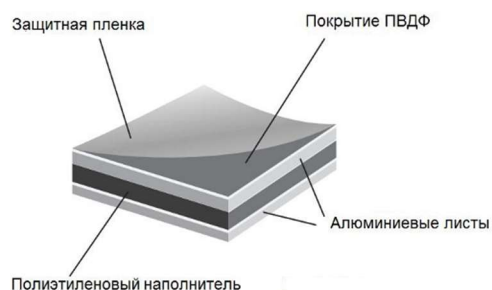


Рисунок 2.1.24.2. Структура алюминиевых панелей

Панели обладают достаточной прочностью и достаточно небольшим весом, а также за счет полиэтиленового наполнителя обеспечивают дополнительную защиту от нейтронов. Произведена сборка корпуса детекторной системы нейтронного дифрактометра. На рисунке 2.1.24.3 показан внешний вид собранных частей сборки корпуса детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА».

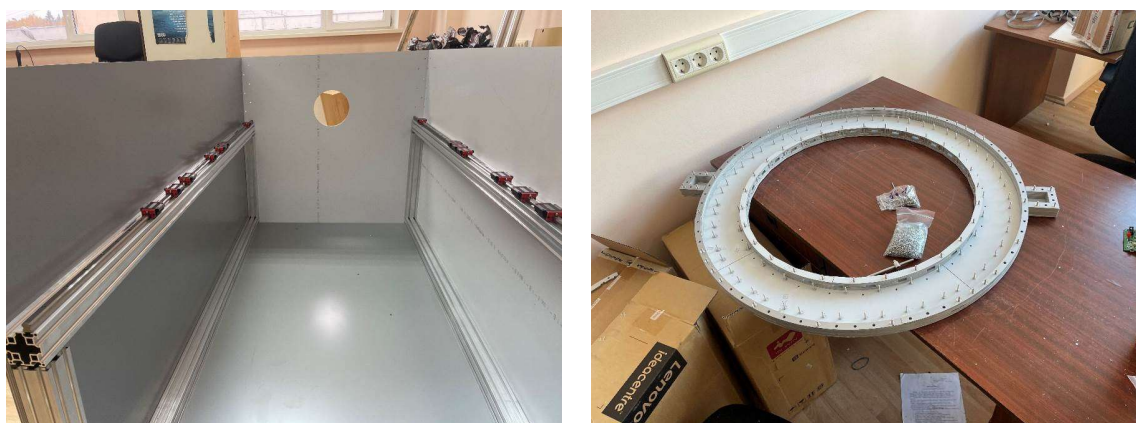


Рисунок 2.1.24.3. Внешний вид детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА»

Сборка произведена в соответствии с конструкторской документацией 02699122.412154.002.000 и ЛНИ-Э.000.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт изготовления и отчет об изготовлении корпуса детекторной системы нейтронного дифрактометра СФЕРА. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.24_Акт_изготовления_Отчет_об_изготовлении_корпуса_детекторной_системы_нейтронного_дифрактометра_СФЕРА.pdf](#)
- Акт сборки и отчет о сборке корпуса детекторной системы нейтронного дифрактометра СФЕРА. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.24_Акт_сборки_Отчет_о_сборке_корпуса_детекторной_системы_нейтронного_дифрактометра_СФЕРА.pdf](#)

2.1.25 Приобретение комплектующих и оборудования, изготовление стендов, подготовка помещений, необходимых для создания прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $ZnS/6LiF$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее 100×100 мм². (Совместно с НИЦ КИ ПИЯФ)

На втором этапе проекта проводились работы, направленные на приобретение комплектующих и оборудования, изготовление стендов, подготовку помещений, необходимых для создания прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $ZnS/6LiF$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее 100×100 мм². На софинансирование данных работ направлены средства из внебюджетных источников.

Цель выполнения работы: приобрести комплектующие и оборудование, изготовить стенды, подготовить помещения, необходимые для создания прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $ZnS/6LiF$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее 100×100 мм².

В результате выполнения работ была осуществлена закупка комплектующих и оборудования на основании договоров Заказчика НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ с Поставщиком ООО «Кор-Сервис» договор №0678 от 20.10.2022 г. и договор №0772 от 10.11.2022 г.

Также были проведены подготовительные работы в помещениях для создания прототипа на основании договора Заказчика НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ с Поставщиком: ООО «ЭТУ ЦЕНТР», договор №0705 от 07.11.2022 г.

Отчетная документация по проведенным работам, включающая Акт выполненных работ, договорную документацию и бухгалтерскую справку представлена в составе Отчета 2 этапа к Договору № 539-100-1/2022 от 04 мая 2022 г. в рамках Соглашения № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. согласно п. 6.6 Приложения №3 к Договору и п. 2.1.25 Плана-графика.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт выполненных работ по приобретению оборудования. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.25_Акт_выполненных_работ_по_приобретению_оборудования.pdf](#)
- Акт выполненных работ по текущему ремонту помещений №313, 333, 339 корп. №7. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.25_Акт_выполненных_работ_по_текущему_ремонту.pdf](#)
- Договорная документация на выполнение работ по текущему ремонту помещений №0705 от 07.11.2022. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.25_Договорная_документация_на_выполнение_работ_по_текущему_ремонту_помещений_№0705_от_07.11.2022.pdf](#)
- Договорная документация на поставку комплектующих и оборудования №0678 от 20.10.2022. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.25_Договорная_документация_на_поставку_комплектующих_и_оборудования_№0678_от_20.10.2022.pdf](#)
- Договорная документация на поставку комплектующих и оборудования №0772 от 10.11.2022. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.25_Договорная_документация_на_поставку_комплектующих_и_оборудования_№0772_от_10.11.2022.pdf](#)

Работы, выполняемые совместно с организациями, действующими в реальном секторе экономики (при наличии)

2.1.26 Сравнительный анализ изменения характеристик конвертеров из аморфного бора ^{10}B и конвертера в виде тонкой плёнки карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Исследование сравнительных характеристик при разной толщине плёнки. (Совместно с АО НИИФТА)

ЛНФ ОИЯИ произвела изготовление оснастки для закрепления подложек для опытных детекторов и подбор режимов магнетронного нанесения тонких плёнок карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на металлические подложки, произвела покрытие комплекта подложек детекторов тонкой плёнкой карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ разной толщины;

АО «НИИТФА» изготовило макеты детекторов, провело испытания макетов детекторов на основе подложек с тонкими плёнками конвертера из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ разной толщины (Акт проведения испытаний №1 от 29.12.2022 г.);

Проведено обсуждение результатов испытаний и выработку рекомендаций по использованию конвертеров нейтронов в виде тонкой плёнки карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ (Акт проведения испытаний №1 от 29.12.2022 г.);

Стороны подготовили совместную публикацию по результатам исследований (Сравнительные исследования пропорциональных счетчиков тепловых нейтронов / Г. В. Полётов, К. Н. Суриков, А. Г. Колесников, В. И. Боднарчук // Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред. — Дубна : Государственный университет «Дубна», 2022. — С. 64.)

Результат испытаний: покрытия, полученные с помощью магнетронного нанесения карбида бора B_4C могут быть использованы в коронно-пропорциональных счётчиках тепловых нейтронов, применяемых для нужд ГК «Росатом».

В ходе испытаний установлено, что толщина покрытия 1,5 мкм карбида бора обогащенного B_4C дает прирост чувствительности 12% для коронно-пропорциональных счётчиков тепловых нейтронов в сравнении с покрытием суспензии бора аморфного обогащенного.

Предложения: продолжить сравнительные исследования образцов покрытий, нанесенных магнетронным напылением. Дополнительно исследовать толщины покрытий в диапазоне 0,1-0,5 мкм, а также в диапазоне 2-4 мкм для установления толщины покрытия, обеспечивающего максимум эффективности (чувствительности) счетчиков тепловых нейтронов.

Сравнительные испытания коронно-пропорциональных счетчиков тепловых нейтронов

Объект испытаний: объектами сравнительных испытаний являются опытные образцы коронно-пропорциональных счётчиков. Длина катода (эффективная) 230 мм, диаметр катода – 32 мм, толщина анода

– 100 мкм. На катоды образцов №1 и №2 нанесено способом магнетронного напыления покрытие В₄С толщиной 1,0 мкм, на катод образца №4 нанесено способом магнетронного напыления покрытие В₄С толщиной 1,5 мкм, на образец №5 - суспензия бора высокой степени обогащения по изотопу ¹⁰В, плотность покрытия 1 мг/см²;

Цель испытаний

Сравнительное исследование чувствительности пропорциональных счетчиков тепловых нейтронов с покрытием катода, выполненным по двум технологиям: нанесения суспензии бора аморфного обогащенного, а также магнетронного нанесения карбида бора В₄С.

Материально-техническое обеспечение

Испытания проводились на экспериментальной установке, схема экспериментальной приведена на рисунке 2.1.26.1

Условия проведения испытаний

Параметры микроклимата: Температура воздуха: 20,3 °С;

Относительная влажность воздух: 44,0%;

Атмосферное давление: 745,0 мм. рт. ст.

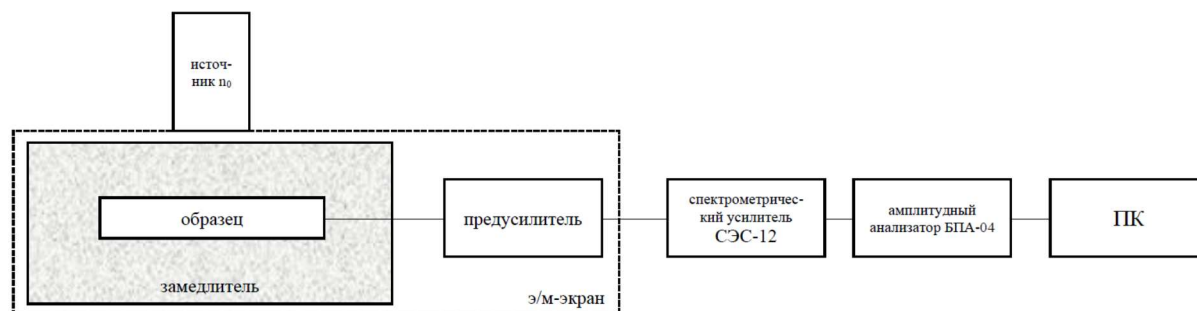


Рисунок 2.1.26.1. Схема экспериментальной установки.

Результаты испытаний по определению относительной чувствительности, представлены в таблице 2.1.26.1.

	Образец №1	Образец №2	Образец №4	Образец №5
Покрывтие	Магнетронное напыление карбида бора В ₄ С	Магнетронное напыление карбида бора В ₄ С	Магнетронное напыление карбида бора В ₄ С	Суспензия В
Толщина покрытия, мкм	1,0	1,0	1,5	4,0
Плотность покрытия, мг/см ²	0,25	0,25	0,375	1,0
Количество импульсов, зарегистрированных за 100 с.	30549	31821	38641	34625
Чувствительность, относительные единицы	0,88	0,92	1,12	1,0

Таблица 2.1.26.1. Результаты сравнительных испытаний.

Результаты измерения амплитудных спектров счетчиков представлены на рисунке 2.1.26.2

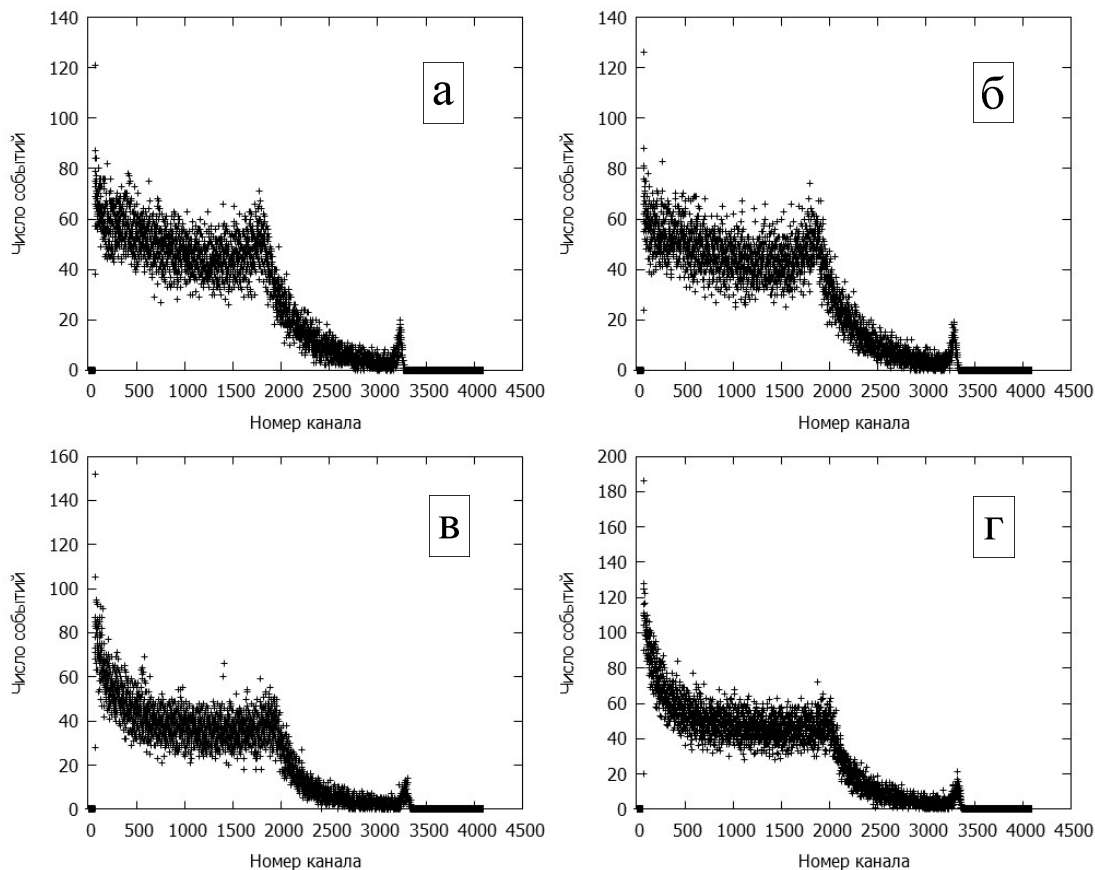


Рисунок 2.1.26.2. Амплитудные спектры пропорциональных счётчиков. а) покрытие В₄С, образец №1 толщина покрытия 1 мкм; б) покрытие В₄С, образец №2, толщина покрытия 1 мкм; в) покрытие В₄С, образец №4, толщина покрытия 1,5 мкм; г) покрытие суспензией В, образец №5, плотность 1 мг/см².

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Предложения по использованию конвертеров в детекторах нейтронов для применения на предприятиях РосАтом на основании протоколов испытаний образцов коронно-пропорциональных счетчиков, изготовленных на предприятии АО «НИИТФА» в рамках договора о сотрудничестве №400-00107/38/7546-Д от 31.08.2022 г. с ОИЯИ. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.1.26_Предложения по использованию конвертеров в детекторах нейтронов на основании протоколов испытаний.pdf](#)

2.2 Мероприятия по созданию сетевой синхротронной и нейтронной научно-исследовательской инфраструктуры на территории Российской Федерации

2.2.1 Реализация 2-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкоплёночных борсодержащих покрытий. Разработка проектной документации

В рамках подготовки инженерного обеспечения опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкоплёночных борсодержащих покрытий разработана проектная документация по следующим разделам:

- «Силовое электрооборудование и освещение» (ЭОМ);
- «Водоснабжение и канализация» (ВК);
- «Отопление, вентиляция и кондиционирование» (ОВ).

ОЭУ будет располагаться в помещении 102 корпуса 119 ЛНФ ОИЯИ и будет предназначено для разработки и изготовления детекторов нейтронов на основе конвертера из карбида бора в рамках проекта "Разработка и создание современных экспериментальных станций источников импульсного или постоянного тока" в рамках Соглашения (Гранта) о предоставлении субсидии между ОИЯИ и Минобрнауки России от 13 октября 2021 г. № 075-10-2021-115. В помещении 102 будет размещаться оборудование для полного цикла изготовления, сборки, наладки и испытания детекторов нейтронов. В отдельной комнате для испытания

детекторов будут использоваться закрытые радиационные источники нейтронов с полной интенсивностью до 10^8 с^{-1} , которые для хранения будут располагаться в бетонной шахте глубиной 2 м.

Вся проектная документация представлена в соответствующих разделах договора на проектирование с компанией ООО «Алюмика» (г. Бор, Нижегородская обл.).

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт о приемке выполненных работ №78 от 24.10.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.1_Акт о приемке выполненных работ №78 от 24.10.22г.pdf](#)
- Договор на выполнение проектных работ №28/22-ПР от 11.10.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.1_Договор на выполнение проектных работ №28/22-ПР от 11.10.22г.pdf](#)
- Проектная документация по разделу АОВ (Автоматизация систем отопления, вентиляции и кондиционирования). ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.1_Проектная документация по разделу АОВ.pdf](#)
- Проектная документация по разделу ОВ (Отопление и вентиляция). ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.1_Проектная документация по разделу ОВ.pdf](#)
- Проектная документация по разделу ЭОМ (Электроснабжение и электроосвещение). ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.1_Проектная документация по разделу ЭОМ.pdf](#)
- Смета работ. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.1_Смета работ.pdf](#)

2.2.2 Реализация 3-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкоплёночных борсодержащих покрытий в части:

А) Приобретение оборудования для подачи технологических газов;

Б) Монтаж фильтровентиляционного оборудования чистой зоны и технологических помещений

А) В рамках подготовки инженерного обеспечения опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкоплёночных борсодержащих покрытий разработана проектная документация системы подачи технологических газов к оборудованию в помещение 102 корпуса 119 Лаборатории нейтронной физики и приобретено некоторое оборудование.

Проект разработан компанией ООО «Промышленная экспертиза» (г. Тверь).

Оборудование и комплектующие приобретены у компаний АО «Вакууммаш» (г. Казань), ООО «Мониторинг Вентиль и Фитинг» (г. Москва).

Б) Компанией ЗАО «Ламинарные системы» (г. Миасс, Челябинская обл.) проведены монтажные работы по возведению 2-х защитных боксов со специальным фильтро-вентиляционным оборудованием, обеспечивающим класс чистоты ИСО 7. Внутри одного из боксов смонтирована установка вакуумного магнетронного напыления, которая будет служить базовым оборудованием ОЭУ. Сдача в эксплуатацию всего ОЭУ планируется на конец 2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт выполненных работ №1378 от 11.11.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.2_Акт выполненных работ №1378 от 11.11.22г.pdf](#)
- Договор на выполнение монтажных работ №7/М от 20.10.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.2_Договор на выполнение монтажных работ №7/М от 20.10.22г.pdf](#)
- Договор поставки №400-00753 от 01.12.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.2_Договор поставки №400-00753 от 01.12.22г.pdf](#)
- Договор поставки №400-00754 от 01.12.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.2_Договор поставки №400-00754 от 01.12.22г.pdf](#)
- Договор поставки №400-00755 от 01.12.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.2_Договор поставки №400-00755 от 01.12.22г.pdf](#)

2.2.3 Реализация 3-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкоплёночных борсодержащих покрытий в части:

Выполнение строительно-монтажных работ за исключением монтажа фильтровентиляционного оборудования чистой зоны и технологических помещений

В рамках создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкоплёночных борсодержащих покрытий в помещении 102 корпуса 119 Лаборатории нейтронной физики проведены масштабные строительно-монтажные работы по подготовке помещений для размещения оборудования ОЭУ. Все работы выполнены специалистами компании ООО «Алюмика» (г. Бор, Нижегородская обл.).

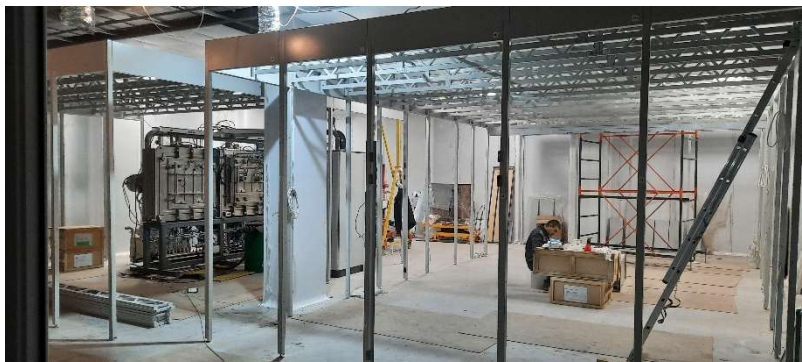


Рисунок 2.2.3.1. Слева – процесс разрушения старых стен и перегородок в процессе подготовки площади для создания ОЭУ. Справа – в подготовленном помещении идет монтаж фильтровентиляционного оборудования чистой зоны. Слева на снимке видна установка вакуумного магнетронного напыления для нанесения пленок карбида бора.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт о приемке выполненных работ №102 от 09.12.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.3_Акт о приемке выполненных работ №102 от 09.12.22г.pdf](#)
- Акт о приемке выполненных работ №112 от 16.12.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.3_Акт о приемке выполненных работ №112 от 16.12.22г.pdf](#)
- Акт о приемке выполненных работ №113 от 16.12.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.3_Акт о приемке выполненных работ №113 от 16.12.22г.pdf](#)
- Акт о приемке выполненных работ №114 от 16.12.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.3_Акт о приемке выполненных работ №114 от 16.12.22г.pdf](#)
- Договор выполнения строительно-монтажных работ №400-00817 от 01.11.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.3_Договор выполнения строительно-монтажных работ №400-00817 от 01.11.22г.pdf](#)
- Договор выполнения строительно-монтажных работ №400-00818 от 01.11.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.3_Договор выполнения строительно-монтажных работ №400-00818 от 01.11.22г.pdf](#)
- Договор выполнения строительно-монтажных работ №400-00819 от 01.11.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.3_Договор выполнения строительно-монтажных работ №400-00819 от 01.11.22г.pdf](#)
- Договор выполнения строительных работ №33-22-СМР от 24.11.22г. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.2.3_Договор выполнения строительных работ №33-22-СМР от 24.11.22г.pdf](#)

2.3 Мероприятия по подготовке специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня

2.3.1 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для специалистов естественно-научного профиля. (Совместно с К(П)ФУ)

Реализована дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов естественно-научного профиля. На программу зачислено 28 человек. Проведены учебные занятия в объеме 54 аудиторных часа (22 ч. лекционные, 28 ч. лабораторные). Аттестовано 28 человек. Выданы удостоверения о повышении квалификации установленного образца.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Данные удостоверений и ведомости аттестации о повышении квалификации "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для естественно-научного профиля. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 2.3.1 Данные удостоверений и ведомости аттестации естественно-научного профиля.pdf](#)

2.3.2 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для специалистов биомедицинского профиля. (Совместно К(П)ФУ)

Реализована дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов биомедицинского профиля. На программу зачислено 4 человека. Проведены учебные занятия в объеме 54 аудиторных часа (22 ч. лекционные, 28 ч. лабораторные). Аттестовано 4 человека. Выданы удостоверения о повышении квалификации установленного образца.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Данные удостоверений и ведомости аттестации о повышении квалификации "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для биомедицинского профиля. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 2.3.2 Данные удостоверений и ведомости аттестации биомедицинского профиля.pdf](#)

2.3.3 Разработка образовательной программы высшего образования "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для студентов естественно-научного профиля. (Совместно с К(П)ФУ)

Разработана образовательная программа высшего образования уровня магистратуры по дисциплине «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для студентов естественно-научного профиля укрупненной группы направлений 03.04.00 «Физика». Разработаны и утверждены в установленном порядке: программа дисциплины, учебный план и календарный учебный график, фонд оценочных средств и система оценки знаний.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Образовательная программа "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для студентов естественно-научного профиля. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 2.3.3 Образовательная программа для студентов естественно-научного профиля.pdf](#)

2.3.4 Разработка образовательной программы высшего образования "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для студентов биомедицинского профиля. (Совместно с К(П)ФУ)

Разработана образовательная программа высшего образования уровня магистратуры по дисциплине «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для студентов биомедицинского профиля укрупненной группы направлений 06.04.00 «Биологические науки». Разработаны и утверждены в установленном порядке: программа дисциплины, учебный план и календарный учебный график, фонд оценочных средств и система оценки знаний.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Образовательная программа "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для студентов биомедицинского профиля. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 2.3.4 Образовательная программа для студентов биомедицинского профиля.pdf](#)

2.3.5 Актуализация перечня на 2022-2023 учебный год научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории. (Совместно с МФТИ)

В 2021 году в Московском физико-техническом институте создана совместная с Объединенным институтом ядерных исследований научно-образовательная лаборатория перспективных технологий для установок и экспериментов мегасайенс (Лаборатория перспективных технологий мегасайенс, приказ 74-6 от 07.12.2021). В задачи лаборатории входит:

- проведение фундаментальных и прикладных научных исследований мирового уровня в области физики, техники и технологий для установок и экспериментов мегасайенс, а также в смежных областях;
- интеграция лаборатории в национальные и международные коллаборации с целью усиления экспертизы в области деятельности лаборатории;
- концентрация на базе лаборатории ведущих ученых и их участие в образовательном процессе МФТИ, включая руководство научно-исследовательской работой студентов, аспирантов, молодых исследователей.

В соответствии с возложенными на нее задачами лаборатория перспективных технологий мегасайенс осуществляет следующие функции:

- выполняет научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, в том числе по заказу предприятий и организаций всех форм собственности, международных организаций;
- привлекает преподавателей и научных работников МФТИ, а также внешних специалистов и экспертов к проведению научно-исследовательских работ на базе Лаборатории;
- выполняет экспертные работы, в том числе обеспечивает участие работников Лаборатории в работе соответствующих рабочих групп и комиссий с участием МФТИ, как государственных, так и неправительственных и международных, по вопросам деятельности Лаборатории;
- участвует в подготовке и проведении научных конференций, семинаров в МФТИ, а также поддерживает и расширяет профильные научные связи, в том числе международные;
- осуществляет подготовку к публикации научных материалов: монографий, статей, отчетов, выступлений, докладов и т.п. в области специализации Лаборатории;
- распространяет посредством Интернета и средств массовой информации научно-просветительскую информацию о результатах научно-исследовательских работ Лаборатории.
- организует семинары и мастер-классы по тематике Лаборатории, в том числе для работников, студентов и аспирантов МФТИ;
- привлекает студентов и аспирантов МФТИ к проведению научно-исследовательских работ на базе Лаборатории;
- содействует установлению устойчивых связей МФТИ с участниками рынка труда в области специализации Лаборатории с целью улучшения возможностей трудоустройства выпускников МФТИ.

В рамках своей деятельности лаборатория принимает участие в мероприятиях Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 – 2027 годы, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 16 марта 2020 г. № 287 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 – 2027 годы»:

а) проведение синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач, в том числе: поддержка научных и научно-технических проектов, выполняемых организациями, в том числе совместно с организациями, действующими в реальном секторе экономики, представителями международного научного сообщества, а также проектов исследователей в возрасте до 39 лет; поддержка разработки и трансфера прорывных технологий, созданных с использованием результатов синхротронных и нейтронных исследований, а также ускорительных, реакторных и ядерных технологий, в том числе в рамках развития ядерной медицины;

б) создание сетевой синхротронной и нейтронной научно-исследовательской инфраструктуры на территории Российской Федерации, в том числе создание и развитие на базе организаций лабораторий и центров, включая центры коллективного пользования, инфраструктуры для хранения, обработки и анализа экспериментальных данных, обеспечивающих ускоренное развитие синхротронных и нейтронных исследований, ускорительных, реакторных и ядерных технологий, в том числе технологий ядерной медицины;

в) подготовка специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня, в том числе: разработка и реализация образовательных программ высшего образования и дополнительных профессиональных программ, направленных на создание прорывных технологических решений с применением синхротронных и нейтронных источников; организация и проведение научных конференций, школ и семинаров для исследователей и обучающихся по направлениям реализации Федеральной программы в возрасте до 39 лет.

К научно-исследовательской работе привлекаются обучающиеся физтех-школы физики и исследований им. Ландау МФТИ, в состав которой входит созданная лаборатория и базовая кафедра ОИЯИ

«Кафедра фундаментальных и прикладных проблем физики микромира», а также обучающиеся других физтех-школ.

В рамках поисковой научно-исследовательской работы лаборатории перспективных технологий мегасайенс МФТИ определены приоритетные тематики, по которым будет проводиться обучение перспективным технологиям моделирования и создания детекторов нейтронов (тонкостеночные дрейфовые трубки, детекторы ультрахолодных нейтронов, микроструктурные газоразрядные детекторы и др.), узлов ускорителей и источников нейтронов, разработке программного обеспечения моделирования и анализа данных для проектирования и работы на исследовательских станциях нейтронных источников. Осваиваемые обучающимися методы являются современными и универсальными и позволят выпускникам вовлекаться в научную работу исследовательских организаций уже на этапе работы над выпускными квалификационными работами бакалавриата и магистратуры, а также выстраивать траекторию научной карьеры, продолжив работу в выбранных направлениях в аспирантуре. К руководству научно-исследовательскими работами привлекаются ведущие ученые ОИЯИ, ведется работа по привлечению ученых и экспертизы ведущих исследовательских центров и коллабораций, которые внесут вклад в разработку перспективных технологий и решений применительно для исследований с использованием источников нейтронов (ESS, ILL, NA62, NA64, DONE, SHIP и др.).

Направление 1: Моделирование много-связанных физических систем с использованием классических подходов математической физики и методов глубокого обучения на архитектуре графических процессоров (GPU).

Рассматриваются так называемые связанные системы (couple problem), в математическом описании которых участвуют несколько постановок задач из различных областей физики. Например, обмотка с током в сверхпроводящем магните. Процесс охлаждения обмотки приводит к ее деформации (уравнение теплопроводности). Изменение геометрии обмотки приводит к перераспределению магнитного поля, которое она создает (уравнения Максвелла). Магнитное поле приводит к возникновению силы Ампера, которая дополнительно деформирует форму обмотки. В результате, возникает задача расчета напряженно-деформированного состояния. При этом весь процесс может являться нестационарным. Полученные результаты используются при моделировании процессов, происходящих в топливных элементах и узлах перспективных источников нейтронов.

Направление 2: Проектирование и разработка программных комплексов для моделирования и оптимизации нелинейных систем, описывающих динамику пучка заряженных частиц в ускорительных установках.

Создание и оптимизация современных ускорительных комплексов, таких как коллайдеры, синхротроны и циклотроны, требует предварительного математического моделирования с высокой степенью реалистичности. Достижение такой цели возможно путем построения математической и компьютерной модели с учетом как можно большего числа параметров и деталей проектируемой установки. Каждый узел установки требует создания для него своей математической модели, которая из-за высокой степени нелинейности уравнений, описывающих ее, требует многократного тестирования в различных режимах. Помимо детальной проработки каждого узла необходима комплексная оптимизация всей системы, то есть выполнение сквозных расчетов динамики пучка, проходящего от точки инжекции до системы вывода.

Направление 3: Интеграция современных систем распределенной обработки Больших Данных для экспериментов по высокоинтенсивному столкновению частиц.

Обработка и анализ экспериментальных, а зачастую и смоделированных данных, являются неотъемлемой частью экспериментов на ускорительных установках. Для современных научных исследований характерно оперирование огромными объемами данных, регистрируемых в ходе высокоинтенсивных столкновений частиц в эксперименте, которые необходимо достаточно быстро обработать и своевременно получить физический результат, соответствующий поставленной цели. Современные вычислительные комплексы характеризуются гетерогенностью по программным и аппаратным ресурсам и географической распределенностью, в связи с чем в данной работе решается задача разработки и внедрения программного решения, базирующегося на современных системах обработки и управления Большими Данными, для распределенной обработки данных, получаемых на установке эксперимента. Комплексное решение поставленной задачи включает интеграцию системы распределенного запуска и управления задачами обработки Больших Данных, внедрение Каталога файлов с данными событий эксперимента, разработку сервиса автоматизации распределенной обработки потока данных эксперимента с учетом выбранных систем.

Направление 4: Разработка и развитие интерфейса системы электронного журналирования для операторов смен идущих сеансов физического эксперимента

Во время сеансов физических экспериментов важное значение для понимания регистрируемых событий имеют не только данные, собираемые с детекторов, но и записи в журналах операторами смен, описывающие

текущие параметры и режимы работы различных систем и детекторов эксперимента во время сеансов и различные типы произошедших событий, а также проблемы и предпринятые действия. Для решения данной задачи разрабатывается система электронного журналирования, предоставляющая сотрудникам смен интерфейс для записи во время сеансов эксперимента данной информации, а также предназначенная для удобного просмотра, корректировки и поиска требуемой информации в журнале членами коллаборации эксперимента. Система электронного журналирования использует базу данных для хранения и работы с данными журнала эксперимента и обеспечения корректного многопользовательского доступа, согласованности, целостности данных и автоматического резервного копирования данных журнала на случай ошибок программного обеспечения или аппаратных сбоев. В рамках данной работы необходимо провести доработку реализованного прототипа интерфейса системы журналирования для внесения и предоставления другим членам эксперимента информации о режимах работы, произошедших событиях и возникших проблемах во время работы, а также расширить функциональные возможности веб-приложения и связанных с ним сервисов и систем.

Направление 5: Разработка и внедрение современной системы визуализации и мониторинга событий столкновения частиц физического эксперимента.

Графическое представление и мониторинг событий столкновения частиц, регистрируемых детекторными системами, являются важной частью и применяются во всех современных, крупных физических экспериментах. Такие системы визуализации событий используются на этапе проектирования и обработки полученных данных для проверки и отладки моделей, а также алгоритмов обработки данных, для визуализации данных реконструкции и физического анализа, а также требуются для мониторинга и контроля выборочных событий эксперимента в режиме онлайн, то есть во время идущего эксперимента. В рамках работы для решения данной задачи необходимо спроектировать и разработать систему визуализации и мониторинга событий столкновения частиц физического эксперимента, которая позволяет графически отображать и управлять геометрией детекторов, модельной информацией (точками, треками частиц) и реконструированными данными (хитами, треками, сработавшими башнями калориметров) как во время, так и после сеансов эксперимента. Данная система должна обеспечивать интерактивность: повороты, масштабирование, выбор и настройку отдельных объектов. Монитор событий физического эксперимента строится согласно клиент-серверной архитектуре с возможностью просмотра членами эксперимента данных событий посредством веб-браузера.

Направление 6: Проектирование и разработка сервиса мониторинга и автоматизированного восстановления функционирования программных систем обработки данных и информационных служб физического эксперимента.

Для современных физических экспериментов характерны большая длительность, высокая сложность и трудоемкость, огромная инфраструктура программного и аппаратного обеспечения, что повышает вероятность какого-либо сбоя во время работы подсистем эксперимента. Для минимизации времени реакции и восстановления различных программных и информационных систем в случае аппаратных или программных проблем важно следить за состоянием данных подсистем, что особенно критично во время проведения сеансов эксперимента. Для решения данной задачи необходима реализация сервиса мониторинга и восстановления, предназначенного для отслеживания состояния задействованных аппаратных узлов, информационных систем и других программных компонент, хранения и визуализации параметров их состояния на централизованном ресурсе, а в случае сбоев оперативного восстановления их работы. В разработке данного сервиса можно выделить два основных этапа. Первый – разработка подсистемы диагностики, которая непрерывно производит мониторинг работы аппаратных узлов, программных систем и служб эксперимента, собирает и визуализирует соответствующие статистические данные, а в случае не пройденных тестов высылает соответствующие уведомления об ошибке ответственному за систему персоналу. Второй этап – реализация подсистемы автоматизированного восстановления приведенным систем, то есть репликация и разворачивание реплицированной системы эксперимента на резервном узле в случае потери работоспособности основной.

Все представленные направления предложены обучающимся МФТИ для проведения научно-исследовательской работы в рамках созданной лаборатории.

В рамках развития образовательной деятельности сотрудником лаборатории д.ф.-м.н. Перепелкиным Евгением Евгеньевичем разработан курс «Параллельное программирование на графических процессорах в задачах теоретической и математической физики». Курс лекций рассчитан на широкий круг студентов, аспирантов и специалистов в различных областях математического моделирования и теоретической физики, для которых программирование не является основной специальностью, а используется ими как дополнительный инструмент в численном моделировании исследуемых задач. В курсе изложены базовые знания, необходимые, чтобы быстро и эффективно начать писать программы на графическом процессоре

(GPU) без специальной подготовки в области программирования. Курс преследует цель изложить материал на простом доступном уровне, в первую очередь, пользователям, занимающимся прикладными задачами. Важным аспектом курса является включение в состав курса задач, в том числе использующихся при моделировании процессов, происходящих в топливных элементах и узлах перспективных источников нейтронов, а также ряда других прикладных задач моделирования узлов станций и источников нейтронов. Курс в формате факультатива читается студентам МФТИ с осеннего семестра 2022/2023 учебного года.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Перечень научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.3.5 Перечень НИР и руководителей НИП.pdf](#)

2.3.6 Ресурсное и инфраструктурное обеспечение в 2022г. научно- образовательной лаборатории для реализации выполнения научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории. (Совместно с МФТИ)

В 2022 году в рамках развития инфраструктуры научно-образовательной лаборатории приобретены материалы, комплектующие и оборудование, в том числе для конструирования экспериментального стенда для тестирования тонкостеночных дрейфовых трубок, детекторов ультрахолодных нейтронов, микроструктурных газоразрядных детекторов и др. на космических мюонах, а также работ по разработке программного обеспечения моделирования и анализа данных (ROOT, Geant4, GARFIELD, FPGA и др.) для проектирования и работы на исследовательских станциях нейтронных источников.

Разрабатываемая система должна позволять выполнять исследовательскую работу по разработке систем детектирования, в которых необходимо учитывать многие параметры, такие как выбор и оптимизация геометрии детекторов, их координатное разрешение и эффективность детектора заряженных частиц в магнитном поле, разрабатывать методы тестирования и отладки модулей детектирования, доказательства их радиационной стойкости и разработки считывающей электроники.

Конструируемый экспериментальный стенд будет включать в себя следующие подсистемы:

- система запуска, состоящая из трех сцинтилляционных детекторов. Два из них с рабочей площадью 145 x 145 мм считываются кремниевыми фотоумножителями (SiPM), третий уровень размером 40 x 40 см считывается фотоэлектронным умножителем и находится за свинцовым фильтром толщиной 37 см;
- калориметр для повышения точности измерений и возможности оцифровки событий, инициированных энергией, интегрированный в общую систему сбора данных;
- высокоточный детектор силиконовой ленты с прямым основанием.

Установка будет включать кремниевый детектор установки VM@N. Детектор состоит из трех уровней: верхнего, среднего и нижнего уровня Si. Верхняя и нижняя часть образуют два детекторных модуля, состоящих из двух двусторонних кремниевых детекторов НИИ МВ с размерами 63x63x0,3 мм³ (640 полос с каждой стороны, размеры сетки 95 и 103 для стороны p + 103 и n + сторона, угол между полосами 2,5 градуса), сварены ультразвуковой сваркой. Средняя плоскость Si состоит из 4 модулей детектирования, содержащих один кремниевый детектор. Каждый модуль состоит из двух емкостных адаптеров с развязкой уровней поляризации по обе стороны от детектора, двух электронных плат считывания на основе 128-канального чипа IDEAS VATAGP 7.1 (5 чипов на считывающую плату) и датчика точности позиционирования.

Испытательная камера на строу-трубках будет включать в себя:

- предварительный усилитель. Преобразователь времени в цифровой может считывать до 128 каналов обнаружения с точностью измерения до 100 пикосекунд, в зависимости от настроек преобразователя времени в цифровой;
- система низковольтного питания усилителей ламповых трековых детекторов и усилителей кремниевых фотоумножителей, а также считывающей электроники кремниевого детектора;
- система высоковольтного питания соломенных детекторов для настройки напряжения смещения кремниевых детекторов и фотоумножителей;
- система сбора данных, аналогичная той, что использовалась в эксперименте VM@N;
- система охлаждения электроники замкнутого кремниевого координатного модуля.

Разрабатываемый стенд будет использовать для отладки систему сбора данных, отработанную на эксперименте VM@N (рисунок 2.3.6.1). Система сбора данных включает в себя два шестидесяти четырёхступенчатых время-цифровых преобразователя, подключенных к усилителям Strow-детектора, три аналогово-цифровых преобразователя в комплекте с секвенсором в качестве считывающей электроники

микростриповых детекторов, модуль формирования триггера, крейт-контроллер, разветвитель триггерного сигнала, триггерный модуль и модуль управления набором данных.

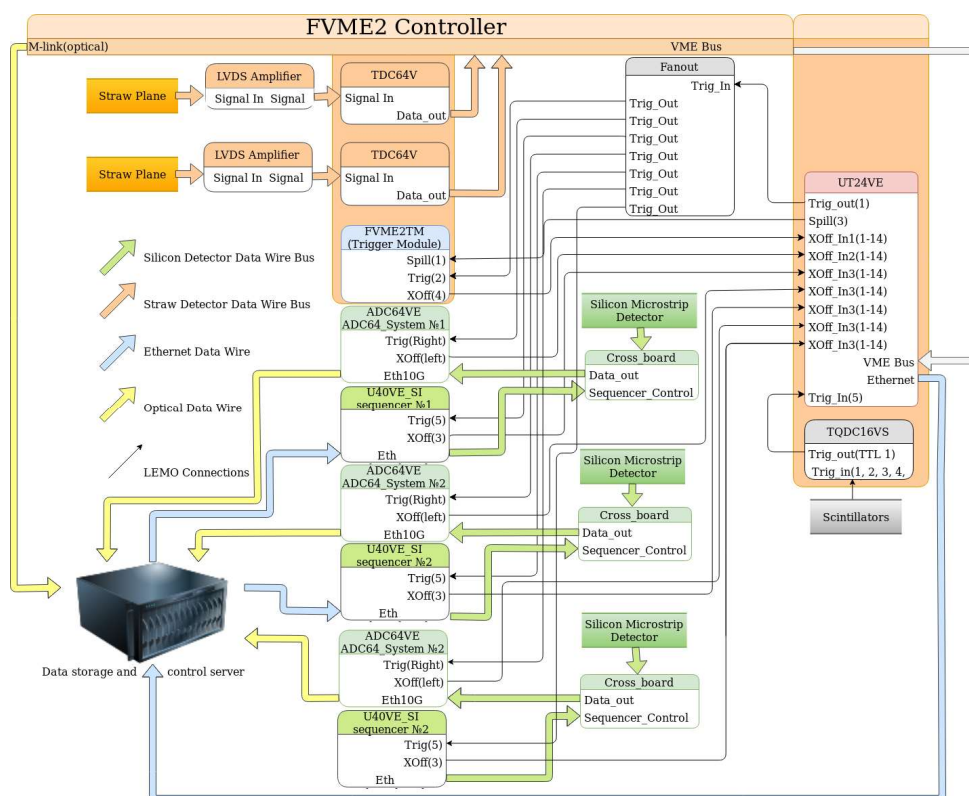


Рисунок 2.3.6.1. Структурная схема системы сбора данных стенда.

Для конструируемого стенда производится выбор программного пакета для разработки или работы в системах реального времени для сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления - SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Проект подразумевает под собой постоянный мониторинг состояния газа и измеренных значений температуры, давления и напряжения. Кроме того, система должна не только визуализировать эти данные, но и уметь их использовать, сообщая оператору, когда индикаторы прошли интересующую нас отметку. Система должна иметь функции, позволяющие интегрировать сторонний код для обработки данных, и она также должна быть известна определенному количеству лабораторного персонала.

В качестве вариантов рассматриваются WinCC и Tango Controls.

WinCC – это мощная и универсальная система для оперативного мониторинга и управления процессами, производственными линиями, машинами и установками во всех областях промышленности. Это позволяет конфигурировать простые операторские станции на одном объекте, а также мощные и распределенные многосайтовые вычислительные системы с обычными или избыточными веб-серверами и клиентами. Система имеет мощный интерфейс для связи процессов, подходит для работы с полным спектром систем автоматизации SIMATIC, предлагает архивирование и защиту данных, эффективна и поддерживает резервированные структуры управления. Система SCADA – это информационный центр, поддерживающий принцип вертикальной интеграции всей компании. Базовая конфигурация системы очень универсальна и может использоваться для настройки команд для различных целей. Специальные решения для отдельных областей промышленного производства могут быть разработаны на основе дополнительного программного обеспечения. Базовое программное обеспечение (WinCC Basic Package) отвечает требованиям многих отраслевых стандартов и поддерживает функции сообщений и подтверждения, архивирование сообщений и значений процесса, запись всех данных процесса и параметров конфигурации, контроль доступа пользователя и визуализацию. Основное программное обеспечение составляет основу решения широкого спектра системных задач по контролю и мониторингу операций, поддерживает множество свободно программируемых интерфейсов и позволяет использовать дополнительное программное обеспечение для решения множества конкретных задач. WinCC можно запустить на любом компьютере, отвечающем системным требованиям этого пакета. В сочетании с промышленными компьютерами SIMATIC Panel IPC и

/ или SIMATIC Rack IPC могут быть реализованы мощные системы, обеспечивающие возможность круглосуточной непрерывной работы.

Основные возможности WinCC:

- Визуализация техпроцесса
- Конфигурирование и настройка связи с контроллерами различных производителей
- Отображение, архивирование и протоколирование сообщений от технологического процесса
- Отображение, архивирование и протоколирование переменных
- Расширение возможностей системы за счёт использования скриптов на языках ANSI C, VBS

и VBA

- Проектирование системы отчетности
- Взаимодействие с другими приложениями, в том числе и по сети, благодаря использованию стандартных интерфейсов OLE, ODBC и SQL обеспечивает простую интеграцию WinCC во внутреннюю информационную сеть предприятия.

- Простое построение систем клиент-сервер.
- Построение резервированных систем.
- Расширение возможностей путём использования элементов ActiveX.
- Открытый OPC-интерфейс (OLE for Process Control).
- Взаимодействие с пакетом Simatic Step 7.

Tango Controls — это объектно-ориентированная структура распределенной системы управления, которая определяет протокол связи, интерфейс прикладного программиста (API) и предоставляет набор инструментов и библиотек для создания программного обеспечения для систем управления, особенно SCADA. Он построен на концепции устройств и классов устройств. Это уникальная особенность Tango Controls, которая отличает его от другого программного обеспечения SCADA, которое обычно рассматривает систему управления как набор сигналов.

Устройства создаются серверами. Серверы — это процессы, реализующие набор классов устройств. Классы устройств реализуют конечную команду (действия или методы), каналы и атрибуты (поля данных) для каждого класса. Таким образом, каждое устройство имеет свои состояния, некоторое множество команд, каналов и атрибутов. Классы устройств отвечают за преобразование протоколов связи оборудования в протоколы связи Tango Controls. Таким образом, возможно осуществлять контроль оборудования, будь то двигатели, клапаны, осциллографы и т.д. Классы устройств могут использоваться для реализации любого алгоритма или действовать как почтовый ящик для любой другой программы или системы.

Tango Controls был разработан для управления маленькими и большими системами. Каждая система имеет централизованную базу данных (MariaDB / MySQL). База данных хранит данные конфигурации, используемые при запуске сервера устройства, и действует как сервер имен, сохраняя динамические сетевые адреса. База данных действует как постоянное хранилище динамических настроек, которые необходимо запомнить. Каждая система Tango Control имеет базу данных и идентифицируется своим хостом Tango. Большая система может состоять из десятков тысяч устройств (предел еще не достигнут). Системы поддерживаются протоколом API поддерживающим прозрачный доступ к устройствам из нескольких систем.

Протокол связи Tango Controls определяет, как все компоненты системы взаимодействуют друг с другом. Tango использует CORBA для синхронной связи и ZeroMQ для асинхронной связи. Детали этих протоколов скрыты от разработчика и пользователя Tango API и инструментами высокого уровня.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Бухгалтерская справка о затратах средств проекта при выполнении работ по договору на выполнение научно-исследовательской работы №4.00/1984/2 от 16.06.22г. ФАЙЛ: [Прил. ПГ_2.3.6_Бухгалтерская справка - Инфраструктура 2022.pdf](#)

2.3.7 Реализация в 2022 г. научно-исследовательских работ (практик) студентов и аспирантов в рамках работы научно-образовательной лаборатории. (Совместно с МФТИ)

В 2021/2022 учебном году МФТИ по итогам конкурсного отбора получил право на проведение Всероссийской олимпиады студентов «Я – профессионал» по четырем направлениям, включая направление «Физика и технологии уникальных научных установок класса «мегасайенс».

Всероссийская олимпиада студентов «Я – профессионал» проводится для студентов бакалавриата, магистратуры, специалитета российских вузов и направлена на проверку теоретических знаний и прикладных компетенций. Главная цель проекта – поддержка талантливых студентов, которая позволит им

продолжить обучение в ведущем российском вузе или начать карьеру. «Я – профессионал» – один из флагманских проектов президентской платформы «Россия – страна возможностей».

Олимпиада «Я – профессионал» по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» проводится с поддержкой ОИЯИ, ФИАН, ТРИНИТИ, НИЦ КИ – ИФВЭ, ИК СО РАН и при участии вуза-соорганизатора НГУ.

В 2022 году состоялся заключительный этап олимпиады по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”». Для участия в заключительном этапе были приглашены студенты категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет», успешно прошедшие отборочный этап в 2021 году.

В заключительном этапе участвовал 41 студент из вузов Москвы, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Томска, Новосибирска, Рязани, Ярославля, Волгограда, Краснодар и Ростова-на-Дону.

Для категории участия «бакалавриат» задания заключительного этапа состояли в письменном решении задач. Для категории участия «магистратура/специалитет» задания заключительного этапа состояли из двух частей: письменного решения задач и устного выступления с докладом.

Для проведения заключительного этапа олимпиады сотрудниками МФТИ, НГУ, НИЦ КИ, НИЦ КИ – ИФВЭ и ТРИНИТИ были разработаны задания заключительного этапа по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» для категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет». Для подготовки студентов к заключительному этапу были разработаны демонстрационные версии заданий каждой категории участия.

Решение заданий заключительного этапа по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» состоялось дистанционно 16 апреля 2022 года. На решение заданий было отведено 4 часа, для наблюдения за участниками использовалась система прокторинга МФТИ. Для выступлений с докладами участников категории «магистратура/специалитет» использовалась система видеосвязи. Доклады были заслушаны комиссией, состоящей из научных сотрудников НИЦ КИ, НИЦ КИ – ИФВЭ, ТРИНИТИ, ОИЯИ, 19 – 22 апреля 2022 года.

По итогам заключительного этапа были определены дипломанты направления «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» в категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет». Дипломы призеров, победителей и медалистов направления «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» получили 24 студента из МГУ, МИФИ, МФТИ, СПбГУ, СПбПУ, ИТМО, НГУ и РГУ им. С. А. Есенина. Для каждой категории дипломантов предусмотрены льготы при поступлении в магистратуру и аспирантуру, возможность получить стажировку/работу в научной организации.

В рамках олимпиады «Я – профессионал» в МФТИ был организован и проведен образовательный форум по физике, который состоялся 4 – 8 июля 2022 года. Форум включал значительную часть мероприятий, посвященных нейтронным и синхротронным исследованиям, физике элементарных частиц, физике плазмы и управляемого термоядерного синтеза и др. направлениям, реализуемым с использованием научных установок класса “мегасайенс”.

На форум были приглашены студенты – участники направлений «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» и «Физика», олимпиаду по которым проводит МФТИ, и направлений физической тематики, олимпиаду по которым проводят другие вузы – участники «Я – профессионал». В форуме участвовали 77 студентов из 38 российских вузов, расположенных в 21 субъекте РФ.

В рамках форума по физике с лекциями выступили ученые ОИЯИ, НИЦ «Курчатовский институт», ТРИНИТИ, для студентов были организованы экскурсии в НИЦ «Курчатовский институт» и ОИЯИ.

Впервые в рамках форума по физике состоялись новые мероприятия, с инициативой о проведении которых выступила Физтех-школа физики и исследований им. Ландау:

“Научный джем” – неформальная встреча студентов и научных сотрудников. Студенты смогли свободно и откровенно поговорить с 11 научными сотрудниками, получить ответы на свои вопросы.

“ФизХакатон” – командное соревнование студентов в решении физических задач, предполагающее теоретическую и экспериментальную части, презентацию решений задач, их защиту и оппонирование.

В 2022/2023 учебном году МФТИ также получил право на проведение олимпиады по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» с поддержкой ОИЯИ, ФИАН, ТРИНИТИ, НИЦ КИ – ИФВЭ, НИЦ КИ, ИК СО РАН и при участии вуза-соорганизатора НГУ.

По итогам регистрации, состоявшейся в период с 29 сентября по 15 ноября 2022 года, для участия в направлении «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» зарегистрировались 3064 студента из 408 вузов, расположенных в 78 регионах России и за рубежом.

63% зарегистрировавшихся студентов – 1942 – студенты бакалавриата. 1122 зарегистрировавшихся участников учатся в магистратуре или специалитете.

Наибольшую заинтересованность при регистрации на направление проявили студенты МФТИ – 307 студентов, НИЯУ МИФИ – 153 студента, НИУ МЭИ – 114 студентов, МГУ – 91 студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана – 73 студента, ДВФУ – 68 студентов, УрФУ – 62 студента, СПбПУ – 58 студентов, РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева – 56 студентов, НИУ ВШЭ – 54 студента.

В 2022 году выросла сравнительная популярность направления «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”», в частности, в VI сезоне количество регистраций впервые превысило соответствующий показатель направления «Квантовые технологии».

Для проведения отборочного этапа сотрудниками МФТИ, НИЦ КИ – ИФВЭ, ТРИНИТИ, ФИАН были разработаны задания отборочного этапа по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» для категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет».

Для подготовки студентов к отборочному этапу олимпиады 11 ноября 2022 года был проведен образовательный вебинар. Вебинар провел доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИЦ КИ – ИФВЭ, сотрудник коллаборации CMS на Большом адронном коллайдере, председатель методической комиссии направления «Физика и технологии уникальных научных установок класса «мегасайенс» С.Р. Слабоспицкий. Вебинар (видео): https://vk.com/video-72263219_456239347.

Обновлена страница направления на сайте МФТИ: <https://lpr.mipt.ru/megascience> и создан телеграм-канал, публикующий актуальную и оперативную информацию для участников направления: <https://t.me/megascienceyaprofessional>.

Отборочный этап по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» проходит с 18 ноября до 4 декабря 2022 года. В течение этого периода участники могут выбрать день и время для того, чтобы приступить к решению задач. На решение отведено 8 часов. Отборочный этап проходит дистанционно с использованием онлайн-платформы Яндекс.Контест.

Итоги отборочного этапа будут подведены в конце декабря 2022 года – начале января 2023 года.

После подведения итогов отборочного этапа студенты, набравшие достаточно баллов в отборочном этапе, будут приглашены на заключительный этап, который состоится в апреле 2023 года. Заключительный этап олимпиады проводится очно или дистанционно с использованием технологий контроля поведения участников (прокторинг).

Для проведения заключительного этапа и подготовки студентов к заключительному этапу по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» сотрудниками МФТИ и организаций-партнеров будут разработаны задания для категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет», организован и проведен образовательный вебинар.

Студентам категории «бакалавриат» на заключительном этапе предстоит решить более сложные задачи, чем задачи отборочного этапа. Студентов категории «магистратура/специалитет» на заключительном этапе ожидают два испытания: решение задач, а также подготовка научного доклада и выступление с ним перед жюри направления.

В течение апреля-мая 2023 года состоится проверка работ участников заключительного этапа, включающая рассмотрение апелляций. Итоги олимпиады будут подведены в мае 2023 года. Участники, показавшие лучшие результаты, получают дипломы призеров, победителей, медалистов. Для каждой категории дипломантов предусмотрены льготы при поступлении в магистратуру и аспирантуру, возможность получить стажировку/работу в научной организации.

Участники направления будут приглашены на образовательный форум олимпиады «Я – профессионал», который ежегодно проводит МФТИ. Форум будет включать значительную часть мероприятий (лекций, экскурсий, др.), посвященных физике элементарных частиц, физике плазмы и управляемого термоядерного синтеза и другим предметным аспектам направления «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”». В рамках форума также проводятся мероприятия, посвященные неформальному общению студентов и действующих ученых и направленные на повышение мотивации студентов к будущей научной работе. Форум состоится весной 2023 года.

Всероссийская олимпиада студентов «Я – профессионал» по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» позволяет студентам, заинтересованным в дальнейшей научной карьере, продолжить образование в вузах РФ, развивающих тематику исследований на установках «мегасайенс», и начать работу в составе научных коллективов таких организаций как ОИЯИ, ФИАН, ТРИНИТИ, НИЦ КИ, ИК СО РАН, ИЯИ РАН и др., а также в лабораториях МФТИ, НГУ и других университетов. Задания олимпиады, составленные научными сотрудниками, дают возможность студентам познакомиться с актуальными исследовательскими проблемами и попробовать свои силы в решении не

учебных, а реальных задач. Мероприятия форума по физике развивают общий кругозор студентов в области их будущих возможностей, знакомят с работой российских установок класса «мегасайенс», с учеными и научными коллективами, их профессиональной деятельностью, текущими проектами и разработками, а также помогают развить навыки интеллектуального сотрудничества и командной исследовательской работы, необходимые для будущей карьеры ученого.

Во всех мероприятиях олимпиады и образовательного форума сотрудники лаборатории принимали активное участие, включая работу в составе организационного комитета.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Выписки из приказов о назначении научных руководителей. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.3.7_Выписки из приказов о назначении научных руководителей.pdf](#)
- Выписки из приказов о направлении на практику. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.3.7_Выписки из приказов о направлении на практику.pdf](#)
- Отчеты обучающихся о научно-исследовательских работах. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.3.7_Отчеты о НИР.pdf](#)

2.3.8 Реализация в 2022 г. образовательной программы для подготовки специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня»:

Модуль 5 «Физика функциональных материалов и наноматериалов». (Совместно с Унив. «Дубна»)

Для выполнения мероприятий приказом №372 от 07 июня 2022 г. «О выполнении работ и утверждении состава рабочей группы по гранту в форме субсидий» сформирована и утверждена рабочая группа (ПРИЛОЖЕНИЕ А).

Приказом № 2544к от 24 августа 2022 года (ПРИЛОЖЕНИЕ Б) организован курс повышения квалификации с 24.08.2022 по 23.11.2022 по дополнительной профессиональной программе «Новые материалы для нейтронных и синхротронных исследований» в объеме 216 часов (ПРИЛОЖЕНИЕ В), утверждено расписание занятий, и зачислены 33 слушателя на места, финансируемые за счет средств гранта в форме субсидии (шифр 2021-951-ФП5-0011).

Целью реализации программы является – практических умений и навыков в области нейтронных детекторов, прикладных исследований нейтронной физики, проектирования приборов для проведения и автоматизации экспериментов в области нейтронной физики, исследования новых функциональных материалов и наноматериалов с использованием рассеяния нейтронов.

Содержание дополнительной профессиональной программы «Новые материалы для нейтронных и синхротронных исследований» и виды учебной деятельности разработаны в соответствии областям знаний и видам деятельности по направлениям реализации Федеральной программы, в частности, в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, области проведения синхротронных и нейтронных исследований. Результатом освоения программы является приобретение новых профессиональных компетенций в соответствии с профессиональным стандартом «Специалист-исследователь в области ядерно-энергетических технологий», утвержден приказом Минтруда России от «16» марта 2018 г. №149н [1]:

- ПК.1 Подготовка исходных данных, наладка экспериментальных стендов и установок для обеспечения выполнения научных исследований,
- ПК.2 Проведение расчетных исследований и измерений физических характеристик на экспериментальных стендах и установках,
- ПК.3 Обработка и анализ результатов расчетных исследований и экспериментальных измерений и составление отчетов по выполненным этапам работ.

Авторский коллектив дополнительной профессиональной программы «Новые материалы для нейтронных и синхротронных исследований»:

- Булавин Максим Викторович, начальник сектора нового источника и комплекса замедлителей ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук;
- Давыдов Евгений Александрович, доц. кафедры фундаментальных проблем физики микромира, канд. физ.-мат. наук;
- Жакетов Владимир Дмитриевич, научный сотрудник научно-экспериментального отдела нейтронных исследований конденсированных сред ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук;
- Колесников Александр Георгиевич, заведующий лабораторией вакуумного напыления Государственного университета «Дубна»;

- Кулин Герман Вячеславович, ст. науч. сотр. отделения ядерной физики ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук;
- Немченков Игорь Борисович, ученый секретарь Государственного университета «Дубна», зав. кафедрой нанотехнологий и новых материалов университета «Дубна», д-р техн. наук;
- Пискунова Оксана Ивановна, директор Инженерно-физического института, канд. техн. наук..

Объем программы 216 часа, из них аудиторных - 184 часа (178 лекции, 6 часов практические занятия) 18 часов - самостоятельная работа, 14 часов – промежуточная и итоговая аттестация. Программа и входящие в нее виды учебной деятельности реализована Соисполнителем самостоятельно, в том числе с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения. Для осуществления образовательного процесса использованы программно-аппаратные комплексы общего назначения (операционная система (операционные системы), офисные приложения, средства обеспечения информационной безопасности, архиваторы, программы для работы с графическими, видео- и аудиофайлами). Формирование электронной информационно-образовательной среды осуществлено с помощью программной системы дистанционного обучения Moodle (lms.uni-dubna.ru).

Образовательная программа содержит 3 модуля с возможностью одновременного освоения.

1) Модуль 1 «Нейтронные детекторы»;

Раздел 1.1 Дисциплина «Введение в нейтронную физику и нейтронную оптику»

Промежуточная аттестация по разделу 1.1 проведена в установленные расписанием занятий сроки.

Зачет получили 33 слушателя (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ Г).

Раздел 1.2. Дисциплина «Основы физики нейтронных и синхротронных исследований»

Промежуточная аттестация по разделу 1.2 проведена в установленные расписанием занятий сроки.

Зачет получили 33 слушателя (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ Д)

2) Модуль 2 «Прикладная нейтронная физика»;

Раздел 2.1 Дисциплина «Ядерные технологии материаловедения»

Промежуточная аттестация по разделу 2.1 проведена в установленные расписанием занятий сроки.

Зачет получили 33 слушателя (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ Е)

Раздел 2.2 Дисциплина «Коммерциализация научных исследований и разработок»

Промежуточная аттестация по разделу 2.1 проведена в установленные расписанием занятий сроки.

Зачет получили 33 слушателя (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ Ж)

3) Модуль 5 «Физика функциональных материалов и наноматериалов».

Объем модуля 96 часа, из них аудиторные – 90 часов, промежуточная аттестация – 6 часа.

Раздел 5.1 Дисциплина «Сцинтилляционные детекторы нейтронов»

Объем раздела 24 часов, из них лекции - 22 часа, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Немченков Игорь Борисович, ученый секретарь Государственного университета «Дубна», зав. кафедрой нанотехнологий и новых материалов университета «Дубна», д-р техн. наук.

Целью данного курса является формирование у слушателей знаний о современных сцинтилляционных материалах и методах их применения при создании экспериментальных установок, регистрирующих нейтронное и иные виды излучения.

Слушатели изучают физические и химические свойства сцинтилляционных материалов, основные технологии их производства, методы их применения в экспериментальных установках для проведения нейтронных и синхротронных исследований. Будут рассмотрены физико-химические принципы создания и модификации сцинтилляционных материалов, способы использования их в качестве рабочего материала детектора, принципы работы сцинтилляционных детекторов.

Содержание раздела:

1. Основы сцинтилляционного метода регистрации ядерных излучений.

Области человеческой деятельности, в которых используется регистрация ядерных излучений.

Классификация методов регистрации ядерных излучений: физические, химические, биологические.

2. Сцинтилляционный метод.

Важные понятия и определения: сцинтилляция, сцинтиллирующее вещество, сцинтиллятор.

Основные и возбужденные состояния молекулярных объектов. Диаграмма Яблонского, основные характеристики фотофизических процессов

3. Сцинтилляционный детектор.

Его основные компоненты. Современные фотодетекторы: фотоэлектронные умножители, фотодиоды. Стадии процесса регистрации ядерного излучения при помощи сцинтилляционного детектора.

4. Основные характеристики сцинтилляторов.

Эффективность регистрации, световыход (абсолютный и относительный), временное разрешение. Классификация сцинтилляционных материалов: неорганические (моно- и поликристаллические, сжиженные благородные газы) и органические (монокристаллы, жидкие сцинтилляторы, пластмассовые сцинтилляторы). Краткое сравнение их свойств.

5. Органические сцинтилляторы. Группы органических сцинтилляторов: монокристаллы, жидкие сцинтилляторы, пластмассовые сцинтилляторы. Достоинства жидких и пластмассовых сцинтилляторов. Основные компоненты жидких и пластмассовых сцинтилляторов: основное вещество, сцинтилляционная добавка, вторичная сцинтилляционная добавка (сместитель спектра). Примеры соединений.

6. Использование жидких сцинтилляторов.

Использование жидких сцинтилляторов в крупномасштабных экспериментах. Требования безопасности.

7. Методы получения пластмассовых сцинтилляторов.

Радикальная полимеризация в массе, суспензионная полимеризация, методы переработки пластмасс (литье под давлением и экструзия). Стадии и технологическая схема производства пластмассовых сцинтилляторов методом радикальной полимеризации в массе. Основные свойства пластмассовых сцинтилляторов на основе полистирола и поливинилтолуола.

8. Механизм акта радиолюминесценции.

Эффективность регистрации отдельных излучений органическими сцинтилляторами, её связь с элементарным составом. Возможность коррекции элементного состава органических сцинтилляторов. Элементосодержащие органические сцинтилляторы (за исключением материалов для регистрации тепловых нейтронов): состав, свойства, области применения. Требования к элементосодержащим добавкам.

9. Органические сцинтилляторы для регистрации тепловых нейтронов.

Области применения органических сцинтилляторов для регистрации тепловых нейтронов (физика нейтронов и нейтринная физика). Элементарный состав органических сцинтилляторов и эффективность регистрации ими тепловых нейтронов.

10. Модификация состава органических сцинтилляторов.

Способы увеличения регистрации тепловых нейтронов. Характеристики захвата тепловых нейтронов ядрами некоторых изотопов.

11. Виды органических сцинтилляторов.

Борсодержащие органические сцинтилляторы. Кадмийсодержащие органические сцинтилляторы. Литийсодержащие органические сцинтилляторы. Композиционные сцинтилляторы для регистрации тепловых нейтронов. Органические сцинтилляторы, содержащие гадолиний. Использование жидких гадолинийсодержащих сцинтилляторов в крупномасштабных нейтринных проектах.

Промежуточная аттестация по разделу 5.1 проведена в установленные расписанием занятия сроки. Зачет получили 33 слушателя (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ И).

Раздел 5.2 Дисциплина «Основы технологии нанесения тонких пленок»

Объем раздела 36 часов, из них: лекции - 32 часа, практические занятия – 2, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Колесников Александр Георгиевич, заведующий лабораторией вакуумного напыления Государственного университета «Дубна».

Целью данного курса является формирование у слушателей знаний о тонкопленочных материалах и методах их применения при создании экспериментальных источников нейтронов и синхротронного излучения.

Слушатели изучают физические и химические свойства тонких пленок, основные технологии их нанесения, методы их применения в экспериментальных установках для проведения нейтронных и синхротронных исследований. Будут рассмотрены физико-химические принципы организации нанесения тонких пленок и покрытий, способы нанесения пленок с использованием как физических, так и химических технологий, методы определения толщин, фазового состава и функциональных свойств пленок.

Содержание раздела:

1. Пленки и покрытия.

Классификация пленок и покрытий. Отличительные особенности тонкопленочного состояния вещества. История становления тонкопленочных технологий. Твердые тонкие пленки. Жидкие тонкие пленки.

2. Получение пленок.

Наиболее часто используемые методы. Химическое и плазмохимическое осаждение из газовой фазы. Вакуумное термическое распыление. Магнетронное распыление. Вакуумно-дуговое нанесение. Ионно-лучевое осаждение. Электронно-лучевое осаждение

3. Подложечные материалы.

Материалы подложек, их свойства, классификация. Требования к подложечным материалам. Подготовка поверхности. Виды очисток поверхности. Контроль состояния поверхности подложки.

4. Физические и химические процессы, происходящие при формировании пленок.

Адсорбция. Межфазное взаимодействие. Зарождение новой фазы. Стадии формирования пленок. Механизмы роста пленок.

5. Свойства тонких пленок.

Роль сил поверхностного натяжения. Температура плавления, степень переохлаждения и межплоскостное расстояние в сравнении с обычным материалом. Ограничения по толщине. Условия образования твердых, жидких и газообразных пленок. Условие Гиббса-Смита.

6. Измерение толщины пленок.

Измерение емкости. Измерение проводимости. Измерение интенсивности отражения света. Эллипсометрия. Применение электронной микроскопии. Применение рентгеновской спектроскопии.

7. Применение тонких пленок.

Нанесение защитных покрытий. Техника высокого вакуума. Применение в микроэлектронике. Применение в оптике. Применение в металлообработке

8. Современные детекторы нейтронов на основе тонких пленок. Выбор материала. Технологии нанесения: преимущества и недостатки. Характерная толщина тонкопленочного покрытия, его физико-химические свойства. Контроль качества тонкопленочного покрытия.

Промежуточная аттестация по разделу 5.2 проведена в установленные расписанием занятий сроки. Зачет получили 33 слушателя (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ К).

Раздел 5.3 Дисциплина «Исследование новых материалов с использованием рассеяния нейтронов»

Объем раздела 36 часов, из них: лекции - 34 часа, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Жакетов Владимир Дмитриевич, научный сотрудник научно-экспериментального отдела нейтронных исследований конденсированных сред ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук;

Целью данного курса является формирование у слушателей знаний о современных методах исследования новых материалов с использованием рассеяния нейтронов.

Слушатели изучают поляризационный анализ и способы формирования поляризованного нейтронного пучка, нейтронные детекторы и рефлектометры. Будут изучены стадии нейтронного рефлектометрического эксперимента, обработка экспериментальных данных. Будут изучены методы модельных расчетов при помощи современных информационных технологий, изучены современные программные пакеты.

Содержание раздела:

1. Рефлектометрия поляризованных нейтронов.

Низкоразмерные системы, рассеяние скалярной частицы на одномерной системе, отражение от многослойной структуры, рекуррентная формула, одномерное рассеяние нейтрона со спином, нейтроны с переворотом спина, режимы: бегущих волн, стоячих и усиленных стоячих нейтронных волн.

2. Нейтронные рефлектометры.

Скользящая геометрия, схема рефлектометрического эксперимента, времяпролетные рефлектометры, замедлители нейтронов, нейтронные прерыватели, короткий и длинный импульс нейтронов, рефлектометры с фиксированной длиной волны, рефлектометры с горизонтальной и вертикальной геометрией образца, сравнение различных рефлектометров, рефлектометр РЕМУР.

3. Поляризаторы и анализаторы нейтронов.

Поляризационный анализ, магнитные суперзеркала, модельные расчёты суперзеркала, пропускание нейтронов через поляризованный газ ^3He , пропускание нейтронов через немагнитные плёнки, анализатор поляризации, верный анализатор поляризации, ведущее поле - адиабатическое и неадиабатическое движение нейтрона в окрестности образца.

4. Нейтронные ротаторы поляризации.

Спин-ротаторы в постоянном магнитном поле, спин-ротаторы в постоянном и переменном магнитных полях, градиентный радиочастотный спин-флиппер.

5. Детекторы нейтронов.

Газовые, сцинтилляционные, позиционно-чувствительные.

6. Формирование нейтронного пучка.

Нейтронный канал, диафрагма, коллиматор, фокусировка пучка нейтронов, нейтронные монохроматоры.

7. Окружение образца.

Электромагнит, криостат ^4He , криостат ^3He , высокочастотное поле, системы позиционирования образца, гониометр.

8. Проведение нейтронного рефлектометрического эксперимента.

Подготовка спектрометра, юстировка образца, управление двигателями, программные пакеты для проведения эксперимента на спектрометре ремур: sonix, newice, remurgui, системы быстрого набора данных типа candor и selene.

9. Обработка экспериментальных данных рефлектометрического эксперимента.

Первичная обработка, программный пакет spectraviewer, определение угла скольжения, определение длины волны нейтрона, нормировка спектра, калибровка спектрометра, деполяризующее поле, представление данных в различных координатах.

10. Модельные расчёты коэффициента отражения.

Сравнение программных пакетов, paratt32, simulreflec, motofit.

11. Изотопно-идентифицирующая нейтронная рефлектометрия.

Регистрация вторичного излучения, заряженные частицы, гамма-кванты, ионизационная камера, полупроводниковый детектор гамма-квантов, расчёт вторичного излучения, особенности обработки экспериментальных данных.

12. Рассеяние при скользящем падении.

Малоугловое рассеяние, незеркальное рассеяние, дифракционное рассеяние, экспериментальные примеры, параметры структур.

13. Магнитные гетероструктуры.

Магнетизм в двумерных системах с пониженной размерностью, магнитно-неколлинеарные системы, сосуществование сверхпроводимости и магнетизма в гетероструктурах.

Промежуточная аттестация по разделу 5.3 проведена в установленные расписанием занятий сроки. Зачет получили 33 слушателя (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ Л).

По итогам обучения слушатели, успешно выполнившие все требования образовательной программы и прошедшие итоговую аттестацию (ведомость итоговой аттестации в ПРИЛОЖЕНИИ М) отчислены приказом от 23.11.2022 №3970к с последующей выдачей удостоверений о повышении квалификации установленного образца (ПРИЛОЖЕНИЕ Н).

№	Фамилия, имя, отчество	Регистрационный документ	Номер документа
1.	Артемьев Степан Алексеевич	16344	502417222157
2.	Беляков Дмитрий Игоревич	16345	502417222158
3.	Булатников Иван Алексеевич	16346	502417222159
4.	Ветров Сергей Сергеевич	16347	502417222160
5.	Голубев Максим Владимирович	16348	502417222161
6.	Елисеев Олег Алексеевич	16349	502417222162
7.	Зудин Андрей Андреевич	16350	502417222163
8.	Ильин Арсалан Тимурович	16351	502417222164
9.	Кашникова Татьяна Васильевна	16352	502417222165
10.	Клименко Ольга Павловна	16353	502417222166
11.	Кузнецов Георгий Александрович	16354	502417222167
12.	Курылёв Владимир Андреевич	16355	502417222168
13.	Лебедев Илья Юрьевич	16356	502417222169
14.	Лукина Елена Сергеевна	16357	502417222170
15.	Марамыгина Екатерина Петровна	16358	502417222171
16.	Мастерских Михаил Александрович	16359	502417222172
17.	Микеладзе Константин Бесарионович	16360	502417222173
18.	Михайловская Ирина Денисовна	16361	502417222174
19.	Николаева Светлана Георгиевна	16362	502417222175
20.	Пахтусов Владислав Юрьевич	16363	502417222176
21.	Пашков Данила Артемович	16364	502417222177
22.	Петрова Мария Олеговна	16365	502417222178
23.	Роевко Анна Олеговна	16366	502417222179
24.	Скапинцев Никита Александрович	16367	502417222180
25.	Тоиров Мухаммаджон Ахмаджонович	16368	502417222181
26.	Тюрин Сергей Витальевич	16369	502417222182
27.	Хабибуллина Агата Евгеньевна	16370	502417222183

28.	Ханафин Тимур Ильфатович	16371	502417222184
29.	Чаулкин Никита Александрович	16372	502417222185
30.	Шамраев Кирилл Сергеевич	16373	502417222186
31.	Шелковкин Данил Денисович	16374	502417222187
32.	Шпилевская Виктория Станиславовна	16375	502417222188
33.	Щигорцов Даниил Алексеевич	16376	502417222189

Таблица 2.3.8.1. Списочный состав лиц, прошедших обучение по программе дополнительного профессионального образования повышения квалификации «Новые материалы для нейтронных и синхротронных исследований» в объеме 216 часов с указанием реквизитов документов, выданных по итогам прохождения обучения

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Модули образовательной программы «Новые материалы для нейтронных и синхротронных исследований». ФАЙЛ: [Прил._ПГ_2.3.8_Модули ОП Новые материалы для нейтронных и синхротронных исследований.pdf](#)
- Оценочные ведомости по образовательной программе «Новые материалы для нейтронных и синхротронных исследований». ФАЙЛ: [Прил._ПГ_2.3.8_Оценочные ведомости.pdf](#)

2.3.9 Проведение в 2022 г. конференции обучающихся и исследователей в возрасте до 39 лет по тематике исследований. (Совместно с Унив. «Дубна»).

Вторая Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» с международным участием проведена 21-23 ноября 2022 года в университете «Дубна». ПРИЛОЖЕНИЕ П - скриншоты страниц сайта <http://conf.uni-dubna.ru/> с информацией об анонсе Второй Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» с международным участием, ПРИЛОЖЕНИЕ Р - страница сайта <http://conf.uni-dubna.ru/> с информацией об анонсе Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред».

Приказ «Об организации и проведении Второй Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» от 20 июля 2022 г. № 386 - ПРИЛОЖЕНИЕ С. Приказ в изменение приказа от 20 июля 2022 г. № 386 «Об организации и проведении Второй Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» от 19 сентября 2022 г. № 438 - ПРИЛОЖЕНИЕ Т.

Целью конференции является обсуждение последних достижений в области теории взаимодействия нейтронного излучения с веществом и методики нейтронного эксперимента, исследования кристаллических и магнитных структур, динамических свойств и элементарных возбуждений в конденсированных средах, исследования биологических систем и объектов культурного наследия, фундаментальных исследований с нейтронами.

Тематика конференции:

- Исследования конденсированных сред с помощью рассеяния нейтронов,
- Разработка и моделирование станций нейтронного рассеяния,
- Детекторы нейтронного излучения,
- Детекторная электроника,
- Методика нейтронного эксперимента
- Автоматизация и обработка экспериментальных данных
- Науки о Жизни (Life science).

Организаторы конференции:

- Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований,
- Федеральное Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Университет «Дубна» (государственный университет «Дубна»),
- Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,
- Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»,
- Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института ядерных исследований Российской Академии наук,
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.

Программный комитет:

- Швецов Валерий Николаевич, канд. физ.-мат. наук, директор Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка – председатель;
- Белушкин Александр Владиславович, д-р физ.-мат. наук, начальник отделения нейтронных исследований и разработок в области конденсированных сред ЛНФ ОИЯИ;
- Боднарчук Виктор Иванович, канд. физ.-мат. наук, начальник Научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ;
- Боос Эдуард Эрнстович, д-р физ.-мат. наук, профессор, член-корреспондент Российской Академии наук, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ им. Ломоносова;
- Гафуров Марат Ревгерович, д-р физ.-мат. наук, заместитель директора по научной деятельности Института Физики ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»;
- Горбунов Николай Васильевич, канд. техн. наук, доц. Государственного университета «Дубна» ведущий науч. сотр. Научно-экспериментального отдела физики на CMS ЛФВЭ ОИЯИ;
- Дмитриев Сергей Николаевич, д-р физ.-мат. наук, проф., член научного совета Российской академии наук (РАН) по физике тяжелых ионов, вице-директор ОИЯИ;
- Кравцов Евгений Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, проф., главный науч. сотр. Лаборатории квантовой наноспинтроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук;
- Красавин Евгений Александрович, д-р б. наук, проф., член-корреспондент Российской Академии наук, председатель Научного совета РАН по радиобиологии, научный руководитель Лаборатории радиационной биологии ОИЯИ;
- Малахов Александр Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой Государственного университета «Дубна», советник при дирекции ЛФВЭ ОИЯИ;
- Немченко Игорь Борисович, д-р техн. наук, доцент, ученый секретарь Государственного университета «Дубна», зав. кафедрой нанотехнологий и новых материалов Государственного университета «Дубна»;
- Садыков Равиль Асхатович, канд. физ.-мат. наук, ведущий науч. сотр. Лаборатории нейтронных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт ядерных исследований» Российской Академии наук.

Организационный комитет

- Крюков Юрий Алексеевич – председатель Конференции, проректор по научной и инновационной деятельности Государственного университета «Дубна», доц., канд. техн. наук;
- Пискунова Оксана Ивановна - ученый секретарь Конференции, директор Инженерно-физического института Государственного университета «Дубна», канд. техн. наук;
- Стифорова Елена Геннадьевна, проректор по учебной работе и молодежной политике Государственного университета «Дубна», доц., канд. юрид. наук;
- Давыдов Евгений Александрович, доцент кафедры фундаментальных проблем физики микромира Государственного университета «Дубна», доц., канд. физ.-мат. наук;
- Клименко Ольга Павловна, ст. преподаватель кафедры ядерной физики Государственного университета «Дубна»;
- Буденная Наталья Николаевна, ст. преподаватель кафедры биофизики Государственного университета «Дубна».

Конференция проведена 21-23 ноября 2022г. в университете «Дубна» (конференц-зал 1-300), подключение участников онлайн осуществлялось посредством системы для видеоконференцсвязи Google Meet.

В работе конференции приняли участие 86 молодых ученых университета «Дубна», ОИЯИ, высших учебных заведений Российской Федерации и ближнего зарубежья. Программа конференции включала 40 докладов по тематике исследований, из них 22 участника в возрасте до 39 лет.

На конференции выступили докладчики из России, Казахстана, Беларуси, Египта.

Участники конференции представляли следующие организации:

1. Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия;
2. Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия;
3. Институт физики, Казанский федеральный университет, Казань, Россия;
4. Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан;
5. Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия;
6. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия;
7. АО «НИИТФА», Москва, Россия;
8. Институт Ядерных Исследований Российской Академии Наук, Москва, Россия;
9. «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия;
10. Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия;
11. Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт Петербург, Россия;
12. Институт физики высоких давлений РАН, Москва, Троицк, Россия;
13. Национальный исследовательский центр Курчатовский институт, Москва, Россия;
14. Филиал «Протвино» государственного университета «Дубна», г. Протвино, Россия;
15. НИЦ ТБП – филиал ФГБУ «ГНЦ Институт иммунологии», г. Большевик, ФМБА России;
16. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); г. Санкт-Петербург, Россия;
17. Институт биомедицинских систем и биотехнологий, г. Санкт-Петербург, Россия;
18. Государственный промышленно-гуманитарный колледж им. В.М. Пескова, г. Воронеж, Россия;
19. НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия;
20. Институт высокомолекулярных соединений РАН, г. Санкт-Петербург, Россия;
21. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия;
22. Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия;
23. Юлихский центр нейтронных исследований GmbH, г. Гархинг, Германия;
24. Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия;
25. Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, Россия;
26. Национальный институт исследований и разработок в области физики и ядерной инженерии имени Хории Хулубея, г. Бухарест-Магуреле;
27. Западный университет Тимишоары, г. Тимишоара, Румыния;
28. Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, г. Санкт-Петербург, Россия;
29. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия;
30. Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, г. Москва, Россия;
31. Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, г. Москва, Россия;
32. ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, г. Москва, Россия;
33. Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Россия;
34. JCNS, Forschungszentrum Jülich GmbH, Outstation at MLZ, г. Гархинг, Германия;
35. Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники" МИЭТ, г. Зеленоград, Россия;
36. Научно-практический центр по материаловедению НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь;
37. Laboratoire Leon Brillouin, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France;
38. НИИ физико-химических проблем Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь;
39. Department of Laser Sciences and Interactions, National Institute of Laser Enhanced Sciences, Cairo University, Giza 12613, Egypt;
40. Казанский национальный исследовательский технологический университет; г. Казань, Россия;
41. Татарский НИИАХП ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань, Россия;
42. Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань, Россия.

Время	МЕРОПРИЯТИЯ
21 НОЯБРЯ 2022 Г.	
9:00-10:00	РЕГИСТРАЦИЯ УЧАСТНИКОВ КОНФЕРЕНЦИИ
10:00-10:10	ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ Фурсаев Дмитрий Владимирович, ректор государственного университета «Дубна». Открытие конференции. Кучерка Норберт, Заместитель директора ЛНФ ОИЯИ по научной работе. Приветственное слово.
	ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ Председатель: Давыдов Евгений Александрович, к.ф.-м.н. доцент кафедры фундаментальных проблем физики микромира
10:10-10:30	<u>Милков Васил Михайлов</u> ¹ , Белушкин А.В. ^{1,2,3} , Богдзель А.А. ¹ , Боднарчук В.И. ¹ , Даулбаев О. ^{1,4} , Дроздов В.А. ¹ , Журавлев В.В. ¹ , Курилкин А.К. ¹ , Куликов С.А. ¹ , Литвиненко Е.И. ¹ , Петрова М.О. ¹ , Подлесный М.М. ¹ , Приходько В.И. ¹ , Чураков А.В. ¹ , Швецов В.Н. ¹ . ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В НЭОКС ИБР-2. (очно) ¹ Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия ² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия ³ Институт физики, Казанский федеральный университет, Казань, Россия ⁴ Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан
10:30-10:50	<u>Кутинова Ольга Васильевна</u> ^{1,2} , Устинов В.В. ^{1,2,3} , Афанасьев С.В. ^{1,2} , Сухов Е.В. ^{1,2} , Устинов Д.В. ^{1,2} ПРОТОТИП ВЫСОКО СЕГМЕНТИРОВАННОГО НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ УСТАНОВКИ VM@N (очно) ¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия ² Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия ³ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
10:50-11:10	<u>Полётов Григорий.Владимирович</u> ¹ , Суриков К.Н. ¹ , Колесников А.Г. ² , Боднарчук В.И. ² СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ СЧЕТЧИКОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ (очно) ¹ АО «НИИТФА», Москва, Россия ² ОИЯИ, Дубна, Россия
11:10-11:30	<u>Быстряков Артём Дмитриевич</u> ^{1,2} , Немченко И.Б. ^{1,2} , Вагина О.П. ¹ , Камнев И.И. ¹ , Казарцев С.В. ¹ КОМПОЗИЦИОННЫЙ НЕЙТРОННЫЙ ДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ (очно) ¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия ² Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия
11:30-11:50	КОФЕ-БРЕЙК
11:50-12:10	<u>Хлюстин Денис Владимирович</u> , Джилкибаев Р.М. РАСЧЕТ СПЕКТРОВ И ВРЕМЕНИ ДИФФУЗИИ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ИЗ МИШЕНИ ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ. (очно) Институт Ядерных Исследований Российской Академии Наук, Москва, Россия
12:10-12:30	<u>Соловьева Татьяна Михайловна</u> ¹ , Соловьев А.Г. ¹ , Куклин А.И. ² , Балашою М. ² , ПРИМЕНЕНИЕ ВЕБ-ТЕХНОЛОГИЙ В ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ. (очно) ¹ ЛИТ ОИЯИ, Дубна, Россия ² ЛНФ ОИЯИ, Дубна, Россия
12:30-12:50	<u>Жукова Алёна Олеговна</u> ¹ , Стрекаловский О.В. ^{1,2}

	<p>ПРОГРАММА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОЦИФРАТОРАМИ САЕН ХХ42 ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРА «КОМЕТА». (очно) ¹ ЛЯР ОИЯИ, Дубна, Россия ² Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия</p>
12:50-13:10	<p>Баутин Виталий Викторович, Горбунов Н. В. УММЗ В НАКАМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ ГАЗОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ С КОНВЕРТЕРОМ НА В4С ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКЕ. (очно) Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия</p>
13:10-14:10	ОБЕД
	<p>ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ Председатель: Давыдов Евгений Александрович, к.ф.-м.н. доцент кафедры фундаментальных проблем физики микромира</p>
14:10-14:30	<p>Усманов Олег Вадимович, Зобкало И.А., Киреенко Ю.М., СОЗДАНИЕ ТРЕХОСНОГО СПЕКТРОМЕТРА ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ IN2 НА РЕАКТОРЕ ПИК. (онлайн) «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия</p>
14:30-14:50	<p>Подлесный Максим Михайлович^{1,2}, Боднарчук В.И.¹, Милков В.М.¹, Богдзель А.А.¹, Даулбаев О.^{1,3}, Курилкин А. К.¹ ОБЗОР ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ⁶LiF/ZnS(Ag) ЭКРАНОВ. РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ДЕТЕКТОРА. (онлайн) ¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, РФ ² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, РФ ³ Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан</p>
14:50-15:10	<p>Павельева Александра Андреевна, Алтынбаев Е.В., Трунов Д.Н., РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ И РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ БОЛЬШИХ ОБЪЕКТОВ. (онлайн) Петербургский Институт Ядерной Физики им. Б.П. Константинова, Гатчина, Россия</p>
15:10-15:30	<p>Юзвюк Мария Херардовна, Киреенко Ю.М., Зобкало И.А. СОЗДАНИЕ ТРЕХОСНОГО СПЕКТРОМЕТРА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА РЕАКТОРЕ ПИК. (онлайн) НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина, Санкт-Петербург</p>
15:30-15:50	<p>Азарова Любовь Александровна^{1,2}, Алтынбаев Е.В.^{1,2}, Яшина Е.Г.^{1,2}, Павлов К.А.^{1,2}, Кириенко Ю.М.¹, Григорьев С.В.^{1,2} МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВОК МУРН НА РЕАКТОРЕ ПИК И РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ ЗА СЧЕТ НЕИДЕАЛЬНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ. (онлайн) ¹ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина ² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт Петербург</p>
15:50-16:10	КОФЕ-БРЕЙК
16:10-16:30	<p>Лебедев Сергей Григорьевич РАДИОХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОР НЕЙТРОНОВ ВЫСОКОПОТОЧНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА. (онлайн) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской Академии наук, г.Москва, Российская Федерация</p>
16:30-16:50	<p>Романова Наталья Константиновна, Айткулов М.Т., Бейсебаев А.О., Гизатулин Ш.Х., Киселёв К.С., Шаймерденов А.А. ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ПОЛЯ НЕЙТРОНОВ В ОБЛУЧАТЕЛЬНОЙ ПОЗИЦИИ РЕАКТОРА ВВР-К. (онлайн)</p>

	<i>Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан, г. Алматы, Казахстан.</i>
16:50-17:10	Садыков Равиль Асхатович ^{1,2} НЕМАГНИТНЫЕ КАМЕРЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ НЕЙТРОНОГРАФИИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ. (онлайн) ¹ <i>Институт ядерных исследований РАН, Москва, Троицк, Россия.</i> ² <i>Институт физики высоких давлений РАН, Москва, Троицк, Россия.</i>
17:10-17:30	<u>Дюжева-Мальцева Елена Вадимовна</u> ¹ , Садыков Р.А. ^{2,3} , Глазков В.П. ¹ НЕЙТРОННЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ «СЖАТИЯ» ПРОСТОЙ МАГНИТНОЙ СПИРАЛИ В ШПИНЕЛЕ ¹¹⁴ CD _{0,3} ZN _{0,7} CR ₂ SE ₄ ПОД ДАВЛЕНИЕМ НА РЕАКТОРЕ ИР-8. (онлайн) ¹ <i>Национальный исследовательский центр Курчатовский институт, Москва, Россия</i> ² <i>Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), Троицк, Россия</i> ³ <i>Институт физики высоких давлений имени Л. Ф. Верещагина РАН, Троицк, Россия</i>
17:30-17:50	<u>Масликов Александр Альбертович</u> ¹ , Алдобаев В.Н. ² , Артемьева А.Д. ³ , Саморокова В.И. ⁴ ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КРИТЕРИЕВ МНОЖЕСТВЕННЫХ СРАВНЕНИЙ НА ВЫБОРКАХ ИЗ НЕНОРМАЛЬНЫХ И НЕГОМОГЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО. (онлайн) ¹ <i>Филиал «Протвино» государственного университета «Дубна», г.Протвино, Россия.</i> ² <i>НИЦ ТБП – филиал ФГБУ «ГНЦ Институт иммунологии», г.Большевик, ФМБА России.</i> ³ <i>Политехнический университет Петра Великого, институт биомедицинских систем и биотехнологий, г.Санкт-Петербург, Россия.</i> ⁴ <i>Государственный промышленно-гуманитарный колледж им.В.М.Пескова, г.Воронеж, Россия.</i>
22 НОЯБРЯ 2022 ГОДА	
	ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ Председатель: Пискунова Оксана Ивановна, к.т.н., директор Инженерно-физического института
10:00-10:20	<u>Петрова Мария Олеговна</u> , Богдзель А.А., Боднарчук В.И., Милков В.М., Курилкин А.К. СПЕКТР ПРОДУКТОВ РЕАКЦИИ КОНВЕРСИИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ ТОНКИМИ ПЛЕНКАМИ GD-157 И В-10. (очно) <i>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия</i>
10:20-10:40	<u>Галустов Владимир Александрович</u> ^{1,2} , Гроздов Д.С. ¹ ВЛИЯНИЕ РЕАКЦИИ ²⁸ Si(n, p) ²⁸ Al НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЛЮМИНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА. (очно) ¹ <i>ОИЯИ, Дубна, Россия</i> ² <i>НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия</i>
10:40-11:00	<u>Рунов Владимир Владимирович</u> ¹ , Бугров А.Н. ^{2,3} , Смыслов Р.Ю. ^{1,2} , Копица Г.П. ¹ , Иванькова Е.М. ² , Павлова А.А. ⁴ , Феоктистов А. ⁵ МАГНИТНОЕ РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ В ВОССТАНОВЛЕННОМ ОКСИДЕ ГРАФЕНА. (очно) ¹ <i>НИЦ КИ ПИЯФ, 188300 Гатчина, Россия</i> <i>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 188300 Гатчина, Россия</i> ² <i>Институт высокомолекулярных соединений РАН, 199004 С.-Петербург, Россия</i>

	³ ЛЭТИ, 197376 С.-Петербург, Россия ⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 С.-Петербург, Россия ⁵ Юлихский центр нейтронных исследований GmbH, 85748 Гархинг, Германия
11:00-11:20	Сархадов Иброхим ¹ , Халиль А.С. ² МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ВОЗНИКАЮЩИХ В МАТЕРИАЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В РАМКАХ МОДЕЛИ ТЕРМИЧЕСКОГО ПИКА. (очно) ¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия ² Государственный Университет Дубна, Инженерно-физический Институт, Дубна, Россия
11:20-11:30	КОФЕ-БРЕЙК
11:30-11:50	СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ
	Никова Екатерина Сергеевна ¹ , Саламатов Ю.А. ¹ , Кравцов Е.А. ^{1,2} ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАНСНОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ ГАДОЛИНИЕМ В МЕТОДЕ ОПОРНОГО СЛОЯ. (онлайн) ¹ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия ² Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, Россия
	Якунина Елена Михайловна ¹ , Кравцов Е.А. ^{1,2} ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МАГНЕТИЗМА В МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСИСТЕМАХ FE/MGO/CR/MGO/FE МЕТОДОМ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПОЛЯРИЗОВЫХ НЕЙТРОНОВ. (онлайн) ¹ ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия ² Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия
	Саламатов Юрий Александрович, Кравцов Е.А. ПРОЦЕССЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В МНОГОСЛОЙНОЙ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ СИЛЬНОПОГЛОЩАЮЩИЙ СЛОЙ, ПРИ НОРМАЛЬНОМ ПАДЕНИИ. (онлайн) Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург
	Оводов Александр Сергеевич ¹ , Коноваленко М.А. ¹ , Куклин А.И. ² , Еник Т. ² , Иваньков А.И. ² , Ской В.В. ² ФОРМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ ЮМО, ИБР-2. (очно) ¹ Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия ² Объединенный Институт Ядерных Исследований, Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка, Дубна, Россия
	Чепурченко Олеся Евгеньевна ¹ , Балашою М. ^{1,2,3} , Рогачев А. ^{1,4} , Кичанов С. ¹ , Лизунов Е. ¹ , Драголич К.А. ² , Ионашку Л. ² , Нику М. ² ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НЕСКОЛЬКИХ ТИПОВ МАТРИЦ ОТВЕРЖДЕННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ ПАСТ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ АЛЮМИНИЕВЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ. (очно) ¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия ² Национальный институт исследований и разработок в области физики и ядерной инженерии имени Хорши Хулубея, Бухарест-Магуреле ³ Западный университет Тимишоары, Тимишоара, Румыния ⁴ МФТИ, Долгопрудный, 141701, Россия
	Макарова Марина Викторовна ^{1,2} , Кравцов Е.А. ^{1,2} ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРИМАГНИТНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР DY/CO РЕФЛЕКТОМЕТРИЕЙ ПОЛЯРИЗОВЫХ НЕЙТРОНОВ ¹ ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ ² Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия
	ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ

11:50-12:10	<p><u>Копица Геннадий Петрович</u>^{1,2}, Котцов С.Ю.^{3,4}, Еров Х.Е.³, Горшкова Ю.Е.⁵, Устинович К.Б.⁴, Симоненко Н.П.⁴, Баранчиков А.Е.⁴, Иванов В.К.⁴</p> <p>МЕЗОСТРУКТУРА ВЫСОКОПОРИСТОГО КРЕМНЕЗЕМА, ПОЛУЧЕННОГО ПУТЕМ ПИРОЛИЗА СИЛИКАТНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ. (очно)</p> <p>¹ <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ "Курчатовский институт", Гатчина, Россия</i></p> <p>² <i>Институт химии силикатов им. И. В. Гребениčkова РАН Санкт-Петербург, Россия</i></p> <p>³ <i>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия</i></p> <p>⁴ <i>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия</i></p> <p>⁵ <i>Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка, Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия</i></p>
12:10-12:30	<p>Халиль Али Саид</p> <p>АМОРИЗАЦИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ В УПРУГОМ И НЕУПРУГОМ РЕЖИМАХ. (очно)</p> <p><i>Государственный Университет Дубна, Инженерно-физический Институт, Дубна, Россия</i></p>
12:30-12:50	<p><u>Пахневич Алексей Валентинович</u>^{1,2}, Николаев Д.И.², Лычагина Т.А.²</p> <p>ГЛОБАЛЬНАЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ ТЕКСТУРА МИНЕРАЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА СКЕЛЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИСКОПАЕМЫХ И СОВРЕМЕННЫХ ЖИВОТНЫХ И РАСТЕНИЙ, ИЗУЧЕННАЯ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ НЕЙТРОНОВ. (очно)</p> <p>¹ <i>Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, г. Москва, Россия</i></p> <p>² <i>Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия</i></p>
12:50-13:10	<p><u>Цвигун Наталья Викторовна</u>¹, Смыслов Р.Ю.^{2,3}, Горшкова Ю.Е.⁴, Хрипунов А.К.³,</p> <p>Ткаченко А.А.⁵, Pirič V.⁶, Radulescu A.⁶, Копица Г.П.^{3,7}</p> <p>К ПРОБЛЕМЕ ОРГАНИЗАЦИИ НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ <i>GLUCONACETOVASTER XYLINUS</i>. (очно)</p> <p>¹ <i>ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия</i></p> <p>² <i>Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Россия</i></p> <p>³ <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, Россия</i></p> <p>⁴ <i>Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка, Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия</i></p> <p>⁵ <i>Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия</i></p> <p>⁶ <i>JCNS, Forschungszentrum Jülich GmbH, Outstation at MLZ, Garching, Germany</i></p> <p>⁷ <i>Институт химии силикатов им. И. В. Гребениčkова РАН Санкт-Петербург, Россия</i></p>
13:10-14:10	ОБЕД
14:10-14:30	<p><u>Сиколенко Вадим Витальевич</u>^{1,3}, Карпинский Д.В.^{1,2}, Силибин М.В.¹, Латушко С.И.^{1,2}, Желудкевич Д.В.^{1,2}, Чобот А.Н.², Вершинина Т.Н.³</p> <p>НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И ОРБИТАЛЬНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ В МУЛЬТИФЕРРОИКАХ НА ОСНОВЕ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ МАРГАНЦА. (онлайн)</p> <p>¹ <i>Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники" МИЭТ, Зеленоград, Россия</i></p> <p>² <i>Научно-практический центр по материаловедению НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i></p> <p>³ <i>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия</i></p>

14:30-14:50	Белозерова Надежда Махмудовна ¹ , Кичанов С.Е. ¹ , Козленко Д.П. ¹ , Лукин Е.В. ¹ , Лис О.Н. ^{1,2} , Савенко Б.Н. ¹ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ФЕРРИТА Zn _{0.34} Fe _{2.53} O ₄ (онлайн) ¹ Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка, ОИЯИ, Дубна, Россия ² Казанский Федеральный Университет, Казань, Россия
14:50-15:10	Сканченко Дарья Олеговна ^{1,2} , Алтынбаев Е.В. ^{1,2,3} , Сидоров В.А. ² , G. Chaboussant ⁵ , N. Martin ⁵ , Саламатин Д.А. ³ , Григорьев С.В. ^{1,3} , Щелкачев Н.М. ² , Магнитская М.В. ² , Цвященко А.В. ² . РАСЩЕПЛЕНИЕ МАГНИТНОГО И КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЙ В Fe _{1-x} Rh _x Ge. (онлайн) ¹ Петербургский Институт Ядерной Физики НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, 188300 Санкт-Петербург, Россия ² Институт Физики Высоких Давлений РАН, 142190, Троицк, Москва, Россия ³ Санкт-Петербургский государственный университет, 198504 Санкт-Петербург, Россия ⁴ Физический институт им. Лебедева РАН, 119991, Москва, Россия ⁵ Laboratoire Leon Brillouin, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France
15:10-15:30	Гурин Валерий Степанович ¹ , Руткаускас А.В. ² , Кичанов С.Е. ² , Горшкова Ю.Е. ^{2,3} ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СТЕКОЛ С ИЗЛУЧАЮЩИМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И НАНОЧАСТИЦАМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. (онлайн) ¹ НИИ физико-химических проблем Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь ² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия ³ Казанский федеральный университет, Казань, Россия
15:30-15:50	КОФЕ-БРЕЙК
15:50-16:10	Mohamed A. Hafez ^{1*} , Sameh A. Akila ¹ , Mohamed A. Khedr ¹ , Ali S. Khalil ² STUDY OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF LASER CLADDING CALCIA AND MAGNESIA-STABILIZED ZIRCONIA COATINGS. (онлайн) ¹ Department of Laser Sciences and Interactions, National Institute of Laser Enhanced Sciences, Cairo University, Giza 12613, Egypt. ² Engineering and Physics Institute, Dubna State University, Dubna 141980, Russia.
16:10-16:30	Шуватова Валентина Георгиевна, Семочкина Ю.П. ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОПУХОЛЕВЫХ СТВОЛОВЫХ КЛЕТОК ЛИНИИ MCF-7 К ДЕЙСТВИЮ РЕДКО- И ПЛОТНОИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ. (онлайн) НИЦ «Курчатовский институт», Москва
16:30-16:50	Миндубаев Антон Зуфарович ¹ , Бабынин Э.В. ² , Минзанова С.Т. ³ ASPERGILLUS NIGER AM1 – ПРИМЕР ЭКСТРЕМОТОЛЕРАНТНОГО ОРГАНИЗМА. (онлайн) ¹ Казанский национальный исследовательский технологический университет, ² Татарский НИИХП ФИЦ КазНЦ РАН ³ Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова ФИЦ КазНЦ РАН
16:50-17:10	Жирник Александр Сергеевич, Родина А.В., Семочкина Ю.П., Романцова А.Н., Бадретдинов Т.М., Москалева Е.Ю. ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ МЫШЕЙ НЕЙТРОНАМИ В НИЗКИХ ДОЗАХ НА КЛЕТКИ МИКРОГЛИИ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ КЛЕТОК МОЗГА К ПОСЛЕДУЮЩЕМУ РАДИАЦИОННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ. (онлайн) НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия
17:10-17:30	Официальное закрытие и подведение итогов работы конференции

Таблица 2.3.9.1. Программа Второй Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» (ПРИЛОЖЕНИЕ У)

Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред: Вторая Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) (Дубна, 21–23 ноября 2022 г.) : сборник тезисов докладов / под общ. ред. В. И. Боднарчука. – представлены тезисы докладов участников Второй Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» по проблемам проведения экспериментов в области нейтронной физики, разработки измерительного оборудования, а также основных направлений фундаментальных и прикладных исследований (ПРИЛОЖЕНИЕ Ф)

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Приказ о проведении и материалы конференции «Задачи и методы нейтронных и синхротронных исследований». ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.3.9_Приказ_Материалы конференции Задачи и методы нейтронных и синхротронных исследований.pdf](#)

2.3.10 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов археологического профиля. (Совместно с К(П)ФУ)

Реализована дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов археологического профиля. На программу зачислено 8 человек. Проведены учебные занятия в объеме 72 аудиторных часа. Аттестовано 8 человек. Выданы удостоверения о повышении квалификации установленного образца.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Данные удостоверений и ведомости аттестации по программе повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов археологического профиля. ФАЙЛ: [Прил_ПГ_2.3.10_Данные удостоверений и ведомости аттестации археологического профиля.pdf](#)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги выполнения работ второго этапа проекта, можно заключить, что все поставленные цели второго этапа достигнуты. Разработана технология нанесения покрытий на основе карбида бора В4С на алюминиевые пластины толщиной 0.5 мм для дальнейшего использования в качестве конвертера нейтронного излучения в детекторах на ускорительных и реакторных источниках нейтронов. Разработаны изготовлены и протестированы первые прототипы новых детекторов тепловых нейтронов, которые показали хорошие характеристики. Проведены конструкторские работы по подготовке технической документации для производства детекторов других типов. Выполнены работы по разработкам отдельных элементов экспериментальных станций нейтронного рассеяния. Проведена модернизация технологического оборудования для создания детекторов. Проведены масштабные строительно-монтажные работы по созданию опытно-экспериментального участка по нанесению тонкоплёночных борсодержащих покрытий в помещении 102 корпуса 119 Лаборатории нейтронной физики. Участок готов к размещению оборудования и в следующем году приступит к работе. В части подготовки молодых специалистов разработаны и внедрены учебные модули, по которым прошли обучение 73 человека, что более чем вдвое превышает плановые показатели. Успешно проведена вторая Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» с международным участием. В работе конференции приняли участие 86 молодых ученых университета «Дубна», ОИЯИ, высших учебных заведений Российской Федерации и ближнего зарубежья. Программа конференции включала 40 докладов по тематике исследований, из них 22 участника в возрасте до 39 лет. В конференции были представлены участники практически со всей территории Российской Федерации, а также немало участников из стран ближнего зарубежья. Проведен заключительный этап олимпиады по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”». Для участия в заключительном этапе были приглашены студенты категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет», успешно прошедшие отборочный этап в 2021 году. В заключительном этапе участвовал 41 студент из вузов Москвы, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Томска, Новосибирска, Рязани, Ярославля, Волгограда, Краснодара и Ростова-на-Дону. По итогам заключительного этапа были определены дипломанты направления «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» в категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет».

Все показатели, включая финансовые за время второго этапа проекта достигнуты, причем многие с превышением плановых значений.

TOM III

№ 121111900090-5



УТВЕРЖДАЮ

Директор института

В.Г. Трубников

13 » января 2024 г.

О Т Ч Е Т

о выполненных работах по реализации исследовательской программы (проекта)

по теме:

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
СТАНЦИЙ НА ИСТОЧНИКАХ НЕЙТРОНОВ ИМПУЛЬСНОГО ИЛИ
ПОСТОЯННОГО ТИПА

(промежуточный)

Этап 3

Федеральная научно-техническая программа развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 – 2027 годы

Соглашение о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидии от 13 октября 2021 г. № 075-10-2021-115 (внутренний номер СиН.21.0021)

Руководитель исследовательской программы (проекта),

Начальник ОНИРКС ЛНФ ОИЯИ,
д-р физ.-мат. наук

подпись, дата 23.01.2024

А.В. Белушкин






Дубна 2024


СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

<p>Руководитель исследовательской программы (проекта), д-р физ.-мат. наук</p>	 _____ подпись	<p>А.В. Белушкин</p>
<p>Исполнитель проекта, старший научный сотрудник</p>	 _____ подпись	<p>А.А. Богдзель</p>
<p>Исполнитель проекта, Начальник отдела НЭОКС ИБР-2, к-т физ.-мат. наук</p>	 _____ подпись	<p>В.И. Боднарчук</p>
<p>Исполнитель проекта, директор ЛНФ ОИЯИ, д-р физ.-мат. наук</p>	 _____ подпись	<p>Е.В. Лычагин</p>
<p>Исполнитель проекта, старший инженер</p>	 _____ подпись	<p>А.Г. Колесников</p>
<p>Исполнитель проекта, начальник сектора, к-т физ.-мат. наук</p>	 _____ подпись	<p>В.М. Милков</p>
<p>Исполнитель проекта, м.н.с.</p>	 _____ подпись	<p>В.В. Садилов</p>

Исполнитель проекта, с.н.с.	 _____	А.В. Чураков
Исполнитель проекта, нач. группы, к-т физ.- мат. наук	 _____	Т.Е. Еник
Исполнитель проекта, инженер	 _____	В.В. Баутин
Исполнитель проекта, Научный сотрудник	 _____	К.М. Саламатин
Исполнитель проекта, В.н.с., д-р физ.-мат. наук	 _____	Б.Ж. Залиханов
Исполнитель проекта, секретарь-референт	 _____	Т.В. Милкова
Исполнитель проекта, ст.инженер	 _____	А.В. Алтынов
Исполнитель проекта, мнс	 _____	М.О. Петрова
Исполнитель проекта, лаборант	 _____	Н.Н. Богомолова
Исполнитель проекта, лаборант	 _____	О.Н. Богомолова

Исполнитель проекта, ведущий инженер	 _____	А.П. Буздавин
Исполнитель проекта, ст.инженер	 _____	В.В. Булавина
Исполнитель проекта, начальник КБ	 _____	К.В. Булатов
Исполнитель проекта, ведущий конструктор	 _____	Ф.М. Котлыков
Исполнитель проекта, лаборант физ.лаб.	 _____	О.В. Володин
Исполнитель проекта, инженер	 _____	О. Даулбаев
Исполнитель проекта, ведущий инженер	 _____	В.А. Дроздов
Исполнитель проекта, лаборант	 _____	О.В. Ермолаева
Исполнитель проекта, ведущий инженер	 _____	В.В. Журавлев
Исполнитель проекта, инженер	 _____	Н.Д. Зернин
Исполнитель проекта, к-т физ.-мат. наук, начальник группы	 _____	А.С. Кирилов

Исполнитель проекта, инженер	 _____ <small>подпись</small>	П.А. Кислицын
Исполнитель проекта, лаборант физ. лаб.	 _____ <small>подпись</small>	И.В. Ковалев
Исполнитель проекта, научный сотрудник, к-т физ.-мат. наук	 _____ <small>подпись</small>	А.К. Курилкин
Исполнитель проекта, снс, к-т физ.-мат. наук	 _____ <small>подпись</small>	Е.И. Литвиненко
Исполнитель проекта, старший инженер	 _____ <small>подпись</small>	Г.Е. Малькова
Исполнитель проекта, ведущий инженер	 _____ <small>подпись</small>	И.А. Морковников
Исполнитель проекта, инженер-программист 1 кат.	 _____ <small>подпись</small>	С.М. Мурашкевич
Исполнитель проекта, инженер-программист 1 кат.	 _____ <small>подпись</small>	Т.Б. Петухова
Исполнитель проекта, мнс, к-т физ.-мат. наук	 _____ <small>подпись</small>	М.М. Подлесный
Исполнитель проекта, ВНС	 _____ <small>подпись</small>	В.И. Приходько

Исполнитель проекта, инженер	 подпись	А.В. Семечкин
Исполнитель проекта, лаборант	 подпись	А.Ч. Сопубекова
Исполнитель проекта, ведущий инженер	 подпись	Г.А. Сухомлинов
Исполнитель проекта, инженер-электроник	 подпись	М.В. Тихонов
Исполнитель проекта, старший инженер	 подпись	Л.А. Трунтова
Исполнитель проекта, старший лаборант	 подпись	Ф.А. Червяков
Исполнитель проекта, снс	 подпись	А.Н. Черников
Исполнитель проекта, инженер-электроник	 подпись	В.В. Швецов
Исполнитель проекта, инженер	 подпись	Н.В. Швецов
Исполнитель проекта, инженер-электроник 1 кат.	 подпись	В.К. Широков

Исполнитель проекта, начальник группы	 _____	А.И. Куклин
Исполнитель проекта, лаборант	 _____	В.Ю. Егоров
Исполнитель проекта, старший лаборант	 _____	А.А. Евсеев
Исполнитель проекта, инженер-электроник	 _____	А.А. Козляковская
Исполнитель проекта, помощник главного инженера	 _____	С.В. Козырев
Исполнитель проекта, МНС	 _____	А.О. Колесников
Исполнитель проекта, начальник сектора	 _____	Н.В. Горбунов
Исполнитель проекта, СНС	 _____	А.В. Красноперов
Исполнитель проекта, начальник группы	 _____	В.В. Терещенко
Исполнитель проекта, инженер	 _____	С.В. Терещенко

СПИСОК СОИСПОЛНИТЕЛЕЙ

№	Название организации	Реквизиты договора с головной организацией	Руководитель работ
1.	Государственный университет «Дубна»	Договор №15-106у от 07.06.2023 г.	О.И. Пискунова Директор Инженерно-физического института Государственного университета «Дубна», кандидат технических наук
2.	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»	Договор №69 от 04.10.2023 г.	М.Р. Гафуров Директор Института физики, доктор физико-математических наук
3.	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»	Договор № 400/1984/3 от 13.06.2023 г.	А.В. Рогачев Ведущий научный сотрудник, Кандидат физико-математических наук
4.	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»	Договор № 148-100-1/2023г. от 23.06.2023 г.	Е.В. Алтынбаев И.О. Зам. Зав. ОДНИ ИЦ НТ, кандидат физико-математических наук
5.	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской Академии наук	Договор № 400-01513 от 30.06.2023 г.	Р.А. Садыков И.О. Зав. Сектора конденсированных сред, ЛНИ, ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук
6.	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук	Договор №13/2023 от 28.06.2023 г.	Е.А. Кравцов Главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук

РЕФЕРАТ

Отчет содержит 102 страницы, 57 рисунков, 4 таблицы, 27 источника, 105 приложений.

Сцинтилляционный счетчик, позиционно-чувствительный детектор, одномерный детектор, сцинтиллятор, прототип счетчика, твердотельный конвертор, газоразрядный модуль, магнетронное напыление, Монте-Карло моделирование, нейтронный фильтр, нейтронное рассеяние, поляризованные нейтроны, нейтроновод, прерыватель пучка, дифрактометрия, рефлектометрия, малоугловое рассеяние, высокопоточный источник нейтронов, метод времени-пролета, сверхрешетка, намагниченность, характеристика тонких пленок, фотоумножитель, контроллер-управления, наноструктуры, световод, фазовая проблема, вторичное излучение, гамма-излучение

В отчете содержатся сведения о проведенных исследованиях, работах и процессе подготовки молодых специалистов, согласно плану-графику работ 3-го этапа исследовательского Проекта «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа» Отчет содержит описание результатов выполнения работ по каждому пункту плана-графики 3-го этапа реализации Проекта со списком приложений, содержащих подтверждающие документы. В выполнении 3-го этапа Проекта принимали участие 7 научных и образовательных организаций:

1. Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований – головная организация проекта
2. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
3. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской Академии наук
4. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук
5. Государственный университет «Дубна»
6. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
7. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	14
ВВЕДЕНИЕ	15
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	17
3.1.1 Создание и испытание многослойных детекторов нейтронов с твердотельным борным конвертером.	17
3.1.2 Изготовление и испытания механического прерывателя пучка нейтронов с временной фокусировкой.	22
3.1.3 Расчет конфигурации нейтронотводной системы рефлектометра для импульсного источника нейтронов моделированием методом Монте-Карло с применением программного пакета VITESS Mc Stas. Разработка математической модели нейтронотводной системы рефлектометра.	24
3.1.4 Создание прототипа регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее 100x100 мм ² , пространственным разрешением не хуже 1.5x1.5x0.05 мм ³ (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ) и проведение его испытаний.	30
3.1.5 Разработка программного решения для определения координаты конверсии нейтрона на площади двумерного позиционно-чувствительного детектора нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ).	33
3.1.6 Создание двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200x200 мм ² с пространственным разрешением не менее 2x2 мм ² с поканальной регистрацией сигнала (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ).	33
3.1.7 Калибровка детекторов от радиоизотопного источника (совместно с ИЯИ РАН).	36
3.1.8 Проведение тестирования параметров детекторов на источнике нейтронов (совместно с ИЯИ РАН).	37
3.1.9 Нейтронные рефлектометрические и дифрактометрические исследования процессов отражения, прохождения нейтронов и генерации вторичного излучения от многослойных наноструктур на основе гадолиния и бора (совместно с ИФМ УРО РАН).	37
3.1.10 Разработка ускорительной и реакторной технологии. Разработка технологии нанесения покрытий на основе карбида бора В ₄ С на полимерные пленки с высокой температурой плавления - полиимид (kapton) и лавсан (maylar) для дальнейшего использования в качестве конвертера нейтронного излучения в детекторах на ускорительных и реакторных источниках нейтронов.	51

3.1.11 Совместные с АО НИИТФА исследования характеристик образцов модернизированных детекторов нейтронов на основе конвертеров с тонкопленочным покрытием из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, изготовленных АО НИИТФА. Подготовка предложений по повышению эффективности детекторов нейтронов для применения на предприятиях РосАтом.	61
3.1.12 Проведение экспериментальных исследований прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $\text{ZnS}/6\text{LiF}$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей с апертурой не менее $100 \times 100 \text{ мм}^2$ (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ).	62
3.1.13 Калибровка одиночных детекторов нейтронов входящих в состав детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА» от радиоизотопного источника (совместно с ИЯИ РАН).	64
3.1.14 Проведение тестирования параметров одиночных детекторов нейтронов входящих в состав детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА» на источнике нейтронов (совместно с ИЯИ РАН).	65
3.1.15 Приобретение комплектующих и оборудования, изготовление стендов, подготовка помещений, необходимых для создания прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее $200 \times 200 \text{ мм}^2$ с пространственным разрешением не менее $2 \times 2 \text{ мм}^2$ (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ).	66
3.2.1 Реализация 4-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий. Поставка оборудования (часть 1).	67
3.2.2 Реализация 4-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий. Поставка оборудования (часть 2).	68
3.3.1 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов естественно-научного профиля (совместно с К(П)ФУ).	69
3.3.2 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов биомедицинского профиля (совместно с К(П)ФУ).	71
3.3.3 Реализация дисциплины "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" образовательной программы высшего образования магистратуры 03.04.02 "Физика" и раздела «Синхротронное и нейтронное излучения» дисциплины «Радиационная физика в биомедицине» образовательной программы высшего образования бакалавриата 12.03.04 "Биотехнические системы и технологии" для студентов естественнонаучного профиля (совместно с К(П)ФУ)	71

<p>3.3.4 Реализация раздела "Применение синхротронного и нейтронного излучения в практической медицине и в области биологических наук" дисциплин "Общая и медицинская радиобиология. Физические основы лучевой диагностики и терапии», "Ядерная медицина" образовательных программ высшего образования специалитета 30.05.01 "Медицинская биохимия", 30.05.02 "Медицинская биофизика" для студентов биомедицинского профиля (совместно с К(П)ФУ).</p>	72
<p>3.3.5 Разработка образовательной программы высшего образования «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для студентов археологического профиля (совместно с К(П)ФУ).</p>	73
<p>3.3.6 Актуализация перечня на 2023/2024 учебный год научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории (совместно с МФТИ).</p>	73
<p>3.3.7 Ресурсное и инфраструктурное обеспечение в 2023 г. научно-образовательной лаборатории для реализации выполнения научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории (совместно с МФТИ).</p>	75
<p>3.3.8 Реализация в 2023 г. научно-исследовательских работ (практик) студентов и аспирантов в рамках работы научно-образовательной лаборатории (совместно с МФТИ).</p>	77
<p>3.3.9 Реализация в 2023 г. для подготовки специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня: Модуль 6 «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров»; Модуль 7 «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды»; Модуль 8 «Радиационная безопасность». (совместно с университетом «Дубна»).</p>	86
<p>3.3.10 Проведение в 2023 г. практической подготовки по образовательной программе «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» (совместно с университетом «Дубна»).</p>	96

<p>3.3.11 Проведение итоговой аттестации по 4 курсам повышения квалификации (Модуль 6 «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров», Модуль 7 «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды», Модуль 8 «Радиационная безопасность», «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики») с выдачей документов о повышении квалификации по каждому курсу. (совместно с университетом «Дубна»).</p>	99
<p>3.3.12 Проведение в 2023 г. конференции обучающихся и исследователей в возрасте до 39 лет по тематике исследований (совместно с ИФМ УО РАН).</p>	100
<p>3.3.13 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов археологического профиля (совместно с К(П)ФУ).</p>	101
<p>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</p>	102

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

BM	- Вибрационная магнитометрия
BMP	- Высоковакуумное магнетронное распыление
КД	- конструкторская документация
мкм	- микрометр, 1 мкм = 0,001 мм
ММН	- Многослойные магнитные наноструктуры
ОПЧД	- одномерный позиционно-чувствительный детектор
ПГ	- план-график
ПМ	- программа и методики испытаний
ПНР	- Рефлектометрия поляризованных нейтронов
ПО	- программное обеспечение
РД	- Рентгеновская дифрактометрия
РЗМ	-Редкоземельный металл
РР	- Рентгеновская рефлектометрия
ТЗ	- техническое задание
XPS	- Фотоэлектронная спектроскопия
ILL	- Институт Лауэ-Ланжевена
Å	- ангстрем, внесистемная единица длины, равная 0.1 нм
λ	- длина волны, измеряется в ангстремах

ВВЕДЕНИЕ

Ключевые слова: сцинтилляционный счетчик, позиционно-чувствительный детектор, одномерный детектор, сцинтиллятор, прототип счетчика, твердотельный конвертор, газоразрядный модуль, магнетронное напыление, Монте-Карло моделирование, нейтронный фильтр, нейтронное рассеяние, поляризованные нейтроны, нейтроновод, прерыватель пучка, дифрактометрия, рефлектометрия, малоугловое рассеяние, высокопоточный источник нейтронов, метод времени-пролета, сверхрешетка, намагниченность, характеристика тонких пленок, фотоумножитель, контроллер-управления, наноструктуры, световод, фазовая проблема, вторичное излучение, гамма-излучение.

Цель работы – проведение синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач, в том числе: поддержка научных и научно-технических проектов, выполняемых организациями, в том числе совместно с организациями, действующими в реальном секторе экономики, представителями международного научного сообщества, а также проектов исследователей в возрасте до 39 лет; поддержка разработки и трансфера прорывных технологий, созданных с использованием результатов синхротронных и нейтронных исследований, а также ускорительных, реакторных и ядерных технологий, в том числе в рамках развития ядерной медицины. Подготовка специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня, в том числе: разработка и реализация образовательных программ высшего образования и дополнительных профессиональных программ, направленных на создание прорывных технологических решений с применением синхротронных и нейтронных источников; организация и проведение научных конференций, школ и семинаров для исследователей и обучающихся по направлениям реализации Федеральной программы в возрасте до 39 лет.

Третий этап проекта «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа» являлся ключевым и самым ответственным этапом выполнения поставленных задач. На третьем этапе помимо решения отдельных задач, рассчитанных на выполнение в течение года, проходило завершение масштабных проектов, на реализацию которых были потрачены усилия всех трех этапов. По итогам третьего этапа можно констатировать, что он стал самым результативным во всех аспектах данного проекта. В течение третьего года выполнения проекта решились научные, инженерно-технические, и образовательные задачи. Значительные усилия и ресурсы были потрачены на развитие научно-технической инфраструктуры, которая станет основой для дальнейшего развития приборной базы экспериментальных станций на источниках нейтронов.

В ходе выполнения задач третьего этапа были реализованы проекты создания уникальных детекторов тепловых нейтронов, параметры которых превосходят параметры детекторов, используемых на станциях нейтронного рассеяния научных центров Российской Федерации. При этом были разработаны детекторы разного типа: на базе сцинтиллятора $ZnS/{}^6LiF$ разработаны и протестированы счетчики и позиционно-чувствительные детекторы. Разработка новых детекторов позволила запустить новый дифрактометр «СФЕРА» на источнике тепловых нейтронов ИИ-06 в ИЯИ РАН. На основе тонкопленочного конвертера из карбида бора B_4C разработаны позиционно-чувствительные детекторы типа «строу-трубок», создан механический фильтр нейтронного пучка, способный значительно улучшать фоновые условия нейтронного эксперимента, особенно на источнике нейтронов импульсного типа. Выполнены научно-исследовательские работы по изучению свойств тонкопленочных структур, которые являются основой для создания нейтронных детекторов в рамках проекта. Разработана технология нанесения покрытий на основе карбида бора B_4C на полимерные пленки с высокой температурой плавления – полиимид и лавсан, позволившая реализовать новый тип детекторов типа «строу-трубка», которые ранее не использовались на станциях нейтронного рассеяния.

Во время реализации третьего этапа был закончен крупный инфраструктурный проект создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий. Были переоборудованы почти 500 кв. м. площадей под создание современной лаборатории, оснащенной передовым оборудованием для создания детекторов тепловых нейтронов на основе конвертера из тонкопленочного карбида бора В₄С. ОЭУ включает в себя чистые помещения с напылительной установкой магнетронного типа, помещения для подготовки подложек, комнаты для проведения тестовых измерений с портативным источником тепловых нейтронов. В 2023 г. ОЭУ был введен в эксплуатацию, и в 2024 г. должны начаться работы по изготовлению детекторов как исследовательских целях, так и по заказам от различных нейтронных центров Российской Федерации.

Третий этап отличался масштабной образовательной деятельностью. Была проведена 3-я научно-практическая конференция для молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред». Конференция хорошо зарекомендовала себя за время реализации проекта, и есть все основания считать, что она продолжит свою деятельность и в будущем, уже после завершения проекта. На базе образовательных организаций, участвующих в проекте, были реализованы курсы повышения квалификации, образовательные курсы, по которым прошли обучение в общей сложности более 140 человек. На базе научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка был организован курс практических занятий для студентов Государственного университета «Дубна», который пошли более 100 учащихся. Занятия вызвали живой интерес у студентов, многие из которых выразили желание выбрать в качестве своей специализации технику нейтронного эксперимента. Это является лучшим показателем качества выполнения поставленных задач в рамках выполнения проекта по привлечению молодых кадров в область наук, связанных с исследованиями нейтронными и синхротронными. Кроме этого было проведено переоснащение учебных лабораторий новым оборудованием и техникой, что серьезно повысит качество подготовки специалистов.

Было продолжено плодотворное сотрудничество с предприятием реального сектора экономики с АО НИИТФА, входящей в Госкорпорацию «Росатом». Используя разработанную технологию напыления пленок карбида бора на алюминиевые поверхности совместно со специалистами АО НИИТФА были изготовлены счетчики нейтронов. Было проведено сравнительное исследование чувствительности пропорциональных счетчиков тепловых нейтронов с покрытием катода, выполненным по двум технологиям: нанесения суспензии бора аморфного (используемого в НИИТФА), а также магнетронного нанесения карбида бора. Предприятие выразило заинтересованность в дальнейшем сотрудничестве и использовании детекторов нейтронов, изготовленных по разработанным в рамках проекта технологиям в производственных целях.

Подводя итоги третьего этапа можно сказать, что он оказался успешным и высоко продуктивным, все поставленные задачи были выполнены. Полученные результаты послужат хорошей основой для последующего развития приборной базы станций нейтронного рассеяния на источниках нейтронов в Российской Федерации и для привлечения молодых кадров, имеющих мотивацию в развитии карьеры в области наук, связанных с рассеянием нейтронного и синхротронного излучений.

3.1 Мероприятия по проведению синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач

3.1.1 Создание и испытание многослойных детекторов нейтронов с твердотельным борным конвертером

В ЛНФ, Научно-экспериментальный отдел комплекса спектрометров (НЭОКС) ИБР-2, изготовлен и испытан многослойный детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B_4C на полимерной пленке.

Был разработан, изготовлен и протестирован многослойный детектор, чувствительная зона которого состоит из 6-ти строу-трубок с напылением B_4C для регистрации тепловых нейтронов. Для изготовления строу-трубок слой B_4C наносился на полимерную пленку методом вакуумного осаждения. Каждая строу-трубка сварена с помощью ультразвука и имеет диаметр 10 мм. Сварка осуществляется из полоски пленки, которую закрепляют на специально подготовленном стержне с отверстиями необходимыми для удержания пленки с помощью вакуума и формирования нахлеста для сварки. Процесс сварки происходит за счет акустических колебаний головки – сонотрода. Колебания головки воздействуют на свариваемые пленки, собранные внахлест, с перекрытием порядка 1 мм, что делает трубку практически однослойной. После сваривания трубки вакуум отключается; в стержень, на котором происходила сварка, подается избыточное давление. За счет попадания воздуха между стержнем и трубкой, изготовленная трубка легко снимается. Фото такой трубки представлено на рис. 2.1.1.1. Трубка изготовлена из металлизированного лавсана (20 мкм) с нанесенным на алюминиевую подложку слоем B_4C с толщиной 550 нм. Толщина напыления $PET/AL/B_4C$ была исследована методом эллипсометрии.

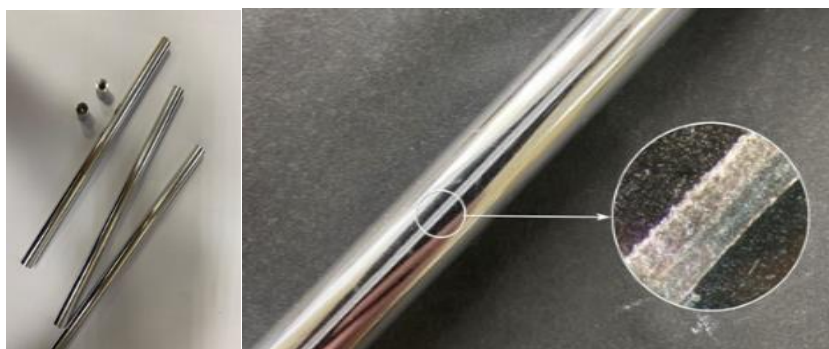


Рисунок 3.1.1.1. Сварной шов трубки из лавсана с покрытием B_4C на внутренней стороне цилиндра.

Для строу детектора был изготовлен корпус, который обеспечил закрепление трубок и анодных 30 мкм. проволоки. Корпус обеспечивает газовый проток рабочей смеси, а также подвод высокого напряжения и считывание сигналов (рис. 3.1.1.2).

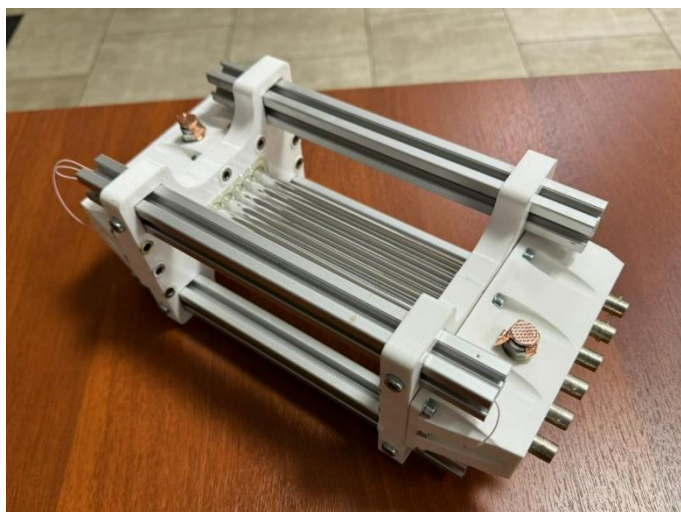


Рисунок 3.1.1.2. Многослойный строу детектор в сборе.

Целью измерений являлась проверка работоспособности детектора и оценка эффективности по сравнению с ^3He счетчиком (He-13/120-8.0), который использовался в качестве эталона. Измерения проводились с источником нейтронов ^{252}Cf , в качестве рабочего газа была использована смесь Ar/CO₂ в двух пропорциях (90/10% и 70/30%) в проточном режиме. Поток нейтронов от источника ^{252}Cf , помещенного в полиэтиленовый куб (18×18×18 см³), был перекрыт листом кадмия (Cd) толщиной 1мм с окном размерами 1×6 см² ориентированным горизонтально. Лист кадмия был закреплен таким образом, чтобы центр окна находился в горизонтальной плоскости с источником ^{252}Cf . Строу детектор был расположен на подложке из блоков свинца, полиэтилена и кадмия толщиной 2 мм (рис. 3.1.1.3). Высота подложки была подобрана таким образом, чтобы строу-трубки полностью перекрывали окно в кадмиевом листе, перекрывающем поток от источника нейтронов и плоскость 6-ти строу трубок была горизонтальна (рис. 3.1.1.4).



Рисунок 3.1.1.3. Блок с замедлителем и место расположения детектора.

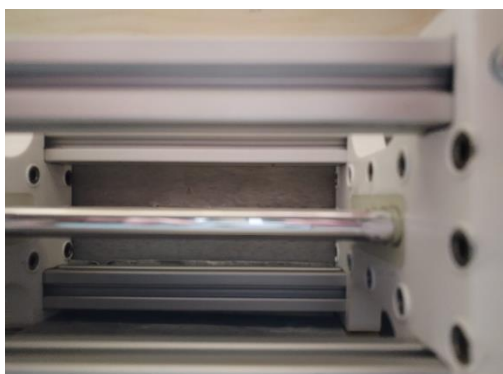


Рисунок 3.1.1.4. Расположение детектора относительно окна в кадмиевом листе. Окно перекрыто полностью.

Детектор в составе экспериментальной установки представлен на рис. 3.1.1.5. Детектор обернут в кадмиевый лист для дополнительной защиты от фона.



Рисунок 3.1.1.5. Детектор в составе экспериментальной установки.

Детектор работает в проточном режиме. Перед началом измерений, с помощью системы подачи и отвода газовой смеси (рис. 3.1.1.6) было задано процентное отношение Ar/CO_2 - 90/10 и скорость потока $40 \text{ см}^3/\text{час}$. Регуляторы расхода газа позволяют точно задать процентное соотношение между компонентами смеси и скорость потока при подаче на них соответствующего напряжения. Работа системы показала стабильность, что наблюдалось по равномерности скорости образования пузырьков в масляном затворе. После этого в систему подачи и отвода газовой смеси был подключен детектор и продувался в течение 17 часов. Скорость образования пузырьков не изменилась существенно, продувка детектора оставалась равномерной в течении всего времени проведения исследований.

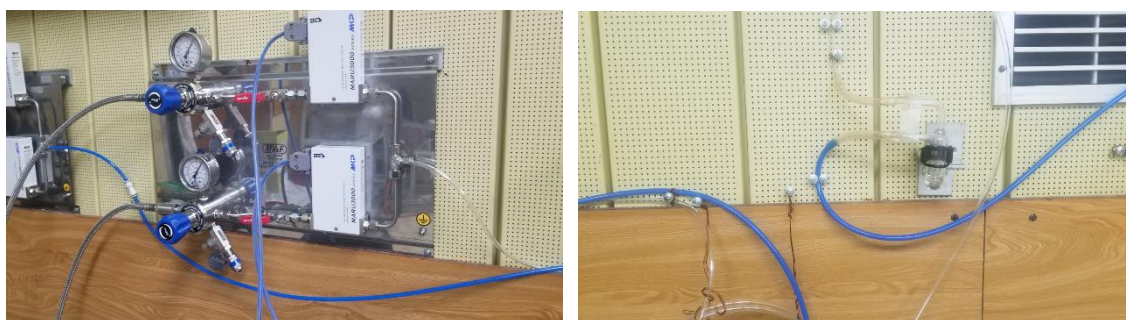


Рисунок 3.1.1.6. Система подачи и отвода газовой смеси: слева -газовый пульт, справа — масляный затвор.

После того как продувка завершилась, детектор был подключен в систему сбора и накопления данных. Система сбора и накопления данных включает в себя: 6-ти канальный зарядочувствительный предусилитель (коэффициент усиления $5\text{V}/\text{pQ}$), 8-ми канальный модуль дигитайзера CAEN N6730 с программным обеспечением COMPASS. Дигитайзер был подключен к компьютеру через оптический интерфейс оптика USB 3.0. На предусилитель подавалось высоковольтное и низковольтное питание. Блоки питания и дигитайзер включены в крейт NIM (рис. 3.1.1.7).

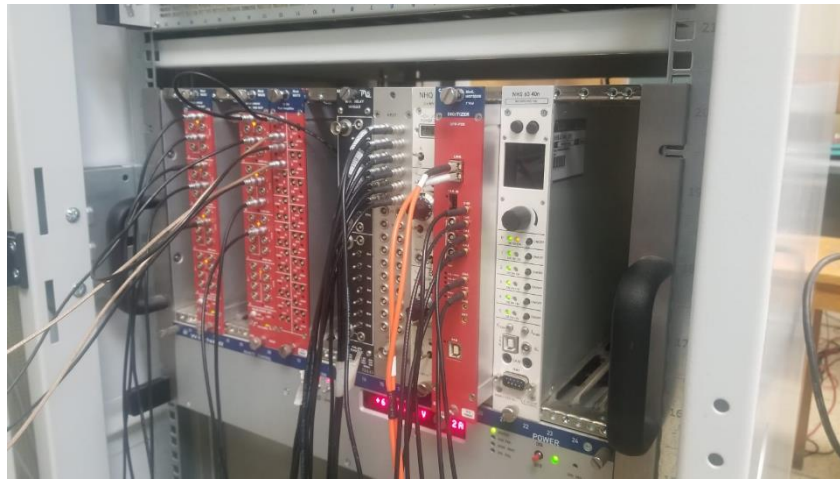


Рисунок 3.1.1.7. Крейт NIM с блоками питания и 8-ми канальным модулем дигитайзера CAEN N6730.

Перед набором данных детектор выводился в рабочий режим путем постепенного повышения высокого напряжения до рабочего ($U=908\text{В}$) с контролем уровня амплитуды сигнала и отсутствием пробоев в детекторе. Набор данных был приведен при двух рабочих смесях с процентным отношением Ar/CO_2 — 90/10% и 70/30%. С каждой строу-трубки детектора сигнал снимался индивидуально. Полученные в результате испытания детектора измеренные амплитудные спектры показаны на рис. 3.1.1.8 и 3.1.1.9. Счетчики пронумерованы в порядке удаления от источника нейтронов ^{252}Cf . В амплитудном спектре, полученном со строу-трубок, четко выделяются пики, соответствующие полной потере кинетической энергии продуктов реакции конверсии в газовом объеме. Подложки слева от пиков обусловлены стеночным эффектом.

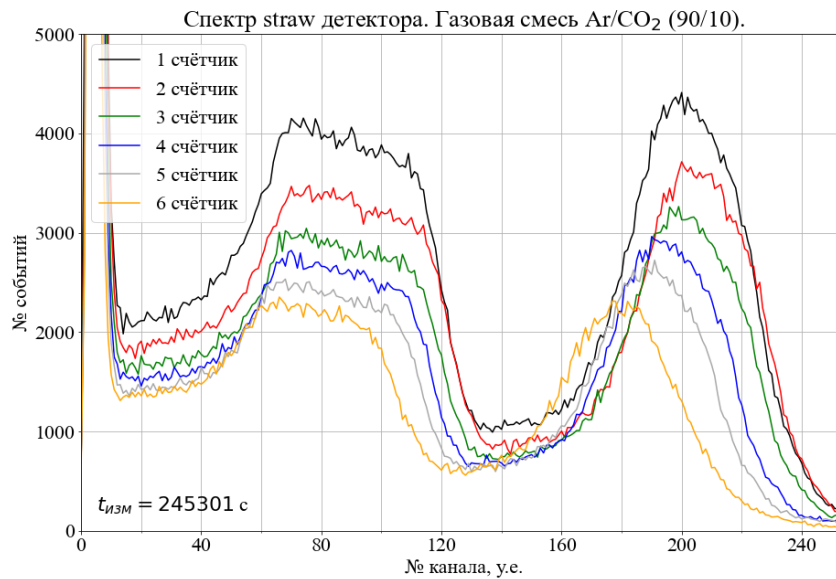


Рисунок 3.1.1.8. Амплитудные спектры детектора с газовой смесью Ar/CO_2 (90/10%).

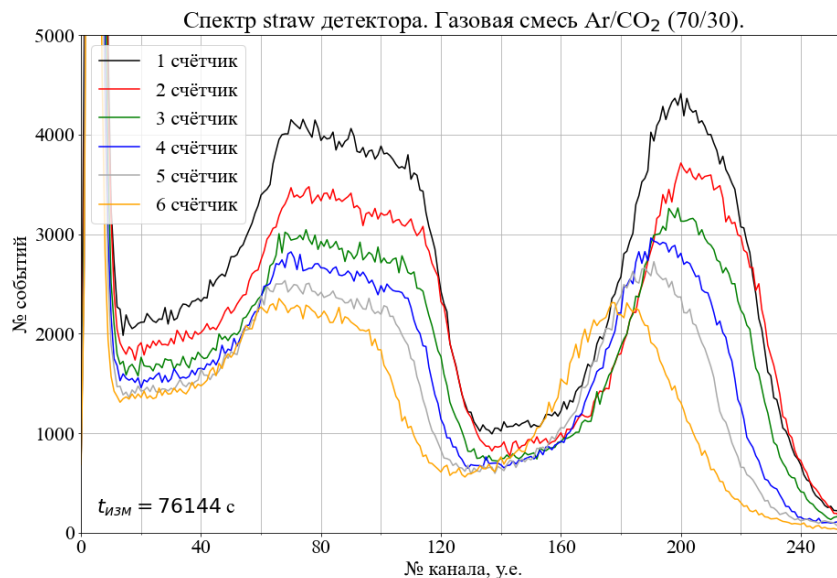


Рисунок 3.1.1.9. Амплитудные спектры детектора с газовой смесью Ar/CO₂ (70/30%).

Для оценки эффективности детектора были проведены измерения с ³He счетчиком (He-13/120-8.0), который использовался в качестве эталона. Следует отметить/ что чувствительные области детекторов различаются почти в 2 раза (~1.3×6 см² для He-13 и 1×15 см² для строу-детектора) и конструкция детектора не позволяет провести измерения непосредственно у окна в кадмиевом листе, поэтому в настоящий момент возможно только качественная оценка эффективности детектора. Счетчик был помещен в положение, которое приблизительно соответствует положению строу-трубки № 1. Счетчик был подключен к системе сбора и накопления данных и набран амплитудный спектр при рабочем напряжении согласно его паспортным данным (рис. 3.1.1.10).

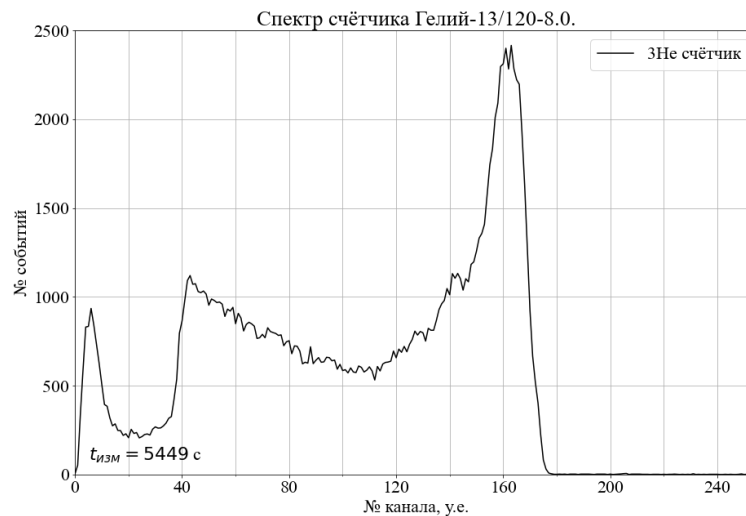


Рисунок 3.1.1.10. Амплитудный спектр счетчика He-13/120-8.0.

На рис. 3.1.1.11 показана нормированная на время измерения скорость счета для каждой трубки строу-детектор, а также скорость счета счетчика He-13, которая составила 24.82 нейтрона/с. Общая скорость счета строу-детектора составляет порядка 11-12 нейтронов/с. Таким образом, относительная чувствительность к тепловым нейтронам составляет 42 % при работе в газовой смеси 90%Ar/10%CO₂ и 46 % при работе в газовой смеси 70%Ar/30%CO₂ по сравнению с чувствительностью счетчика He-13.

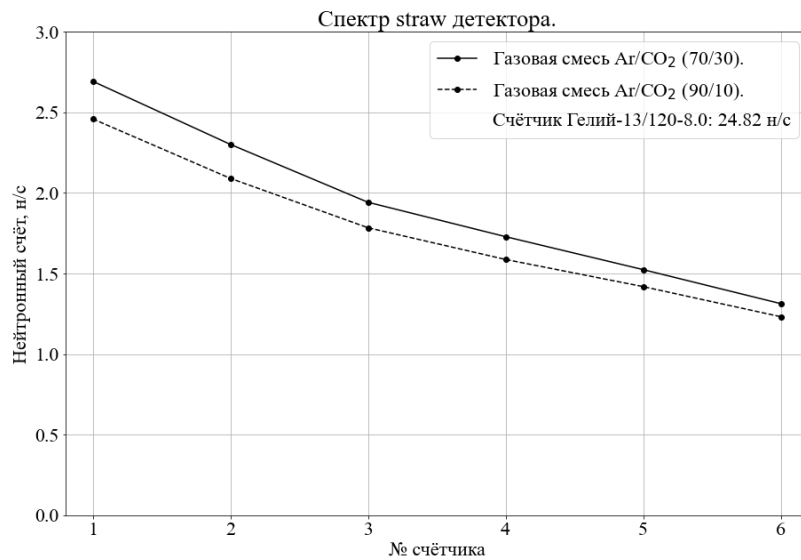


Рисунок 3.1.1.11. Нормированная по времени скорость счета нейтронов различными строу-трубками детектора.

Проведенные испытания показывают, что эффективность многослойного строу детектора нелинейно увеличивается, достигая насыщения, в зависимости от числа слоев и толщины слоя В₄С. В амплитудном спектре пики, соответствующие полной потере кинетической энергии продуктов реакции конверсии в газовом объеме, хорошо видны и легко отделяются от гамма-фона путем установления порога. Согласно расчетам, дальнейшее усовершенствование конструкции детектора путем увеличения количества трубок и толщины слоя конвертера В₄С, приведет к созданию детекторов с высокой эффективностью к тепловым нейтронам. Так, для строу детектора с количеством трубок в слое вдоль пучка 15 и толщине напыления 1.5 мкм эффективность детектора составит порядка 58% для нейтронов с длиной волны 1.8А.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Техническое задание на многослойные детекторы. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.1 Техническое задание.pdf](#)
- Программа и методика испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.1 Программа и методика испытаний.pdf](#)
- Акт испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.1 Акт испытаний.pdf](#)
- Протокол испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.1 Протокол испытаний.pdf](#)
- Конструкторская документация. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.1 Конструкторская документация.pdf](#)
- Акт изготовления. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.1 Акт изготовления.pdf](#)

3.1.2 Изготовление и испытания механического прерывателя пучка нейтронов с временной фокусировкой

Определяющим фактором качества получаемых экспериментальных данных является отношение сигнал-шум. Поэтому в любом эксперименте вопрос подавления посторонних шумов или фона является принципиальным. В экспериментах по нейтронному рассеянию, где источником нейтронов служит реактор, одним из главных инструментов подавления фона является механический прерыватель пучка. Его основная задача состоит в открытии канала распространения пучка нейтронов на строго определенное время, которое позволит пропустить нейтроны требуемого спектрального диапазона, и излученных в определенном временном интервале. Канал пучка для всех остальных нейтронов должен перекрываться поглощающим материалом прерывателя. Такой способ формирования пучка нейтронов используется на установках на импульсном реакторе ИБР-2. Как правило, это вращающийся вокруг своей оси полнотелый цилиндр из поглощающего нейтроны материала с вырезанным каналом или поглощающий нейтроны диск с вырезанным

сектором. Фаза вращения прерывателя строго коррелирована с импульсами реактора, и, таким образом, характеристики пучка нейтронов остаются постоянными для всех импульсов реактора. Спектр нейтронного излучения от замедлителя реактора в каждый момент времени охватывает весь диапазон энергий, согласно распределению Максвелла. Интенсивность излучения зависит от значения мощности реактора, которая в случае реактора ИБР-2 не опускается до нуля даже между импульсами мощности. На импульсных источниках нейтронов наиболее удобной методикой проведения измерений является метод времени пролета, в котором скорость нейтронов определяется по времени пролета расстояния от источника до детектора с началом отсчета времени в момент импульса. Для определения скорости нейтронов с хорошим разрешением важно, чтобы в канал распространения пучка не попали нейтроны, излученные в моменты времени за пределами временной ширины импульса источника, иначе такие нейтроны будут смешиваться с нейтронами, излученными в период длительности импульса, и будут вносить искажения в определение величины скорости зарегистрированных нейтронов. Задача прерывателя как раз и состоит в поглощении нейтронов, родившихся вне импульса источника.

Принцип работы прерывателя легко проиллюстрировать с помощью временной диаграммы, на которой по оси абсцисс откладывается время, а на оси ординат – пролетная база (рис. 3.1.2.1а). Окно прерывателя позволяет нейтронам из импульса с диапазоном скоростей от $v_{pulse\ min}$ до $v_{pulse\ max}$ и всем нейтронам излученным во временном интервале Δt пройти, остальные же будут поглощены. Как видно из диаграммы, прерыватель типа, изображенного на рис. 3.1.2.1а открывает довольно широкое временное окно Δt , в которое пролетают нейтроны вне импульса.

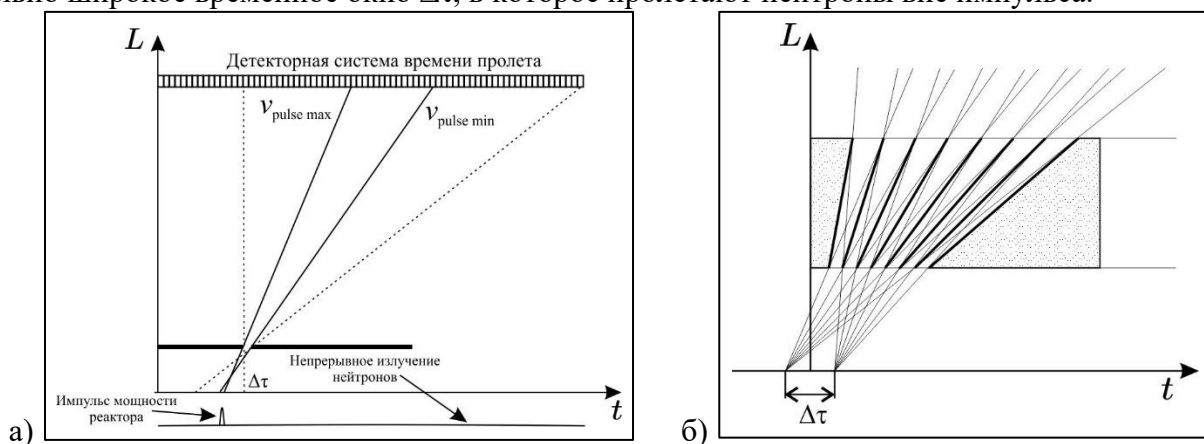


Рисунок 3.1.2.1. Времяпролетные диаграммы механических прерывателей пучка. а) диаграмма, демонстрирующая принцип работы дискового(барабанного) прерывателя. На расстоянии от источника расположен детектор, который накапливает количество нейтронов в узких временных каналах. Отдельный временной канал соответствует определенному диапазону скоростей Δv . Сплошные линии указывают на спектральный диапазон от самого импульса, пунктирные линии показывают весь спектральный диапазон нейтронов, который пропустит прерыватель. б) Диаграмма, демонстрирующая принцип работы изобретения. Никакие нейтроны, кроме тех, что были излучены в интервале времени Δt не смогут попасть в детектор.

Предложенная конструкция (рис. 3.1.2.2) позволяет уменьшить временное окно видимости источника Δt и тем самым убрать из пучка нейтроны, излученные вне импульса источника. Достигается это тем, что прерыватель имеет форму цилиндра и его окно представляет собой набор узких расходящихся каналов без прямой видимости, каждый из которых может пропустить строго определенный диапазон скоростей нейтронов лишь в требуемом диапазоне времени (Рис. 3.1.2.1б). Величина этого интервала и его положение на временной оси будет определяться конкретными характеристиками конструкции. Для реактора ИБР-2, очевидно таким интервалом должен быть выбран импульс реактора. Более того размеры каналов можно подобрать таким образом, что отношение $\Delta v/v$ будет постоянным для всего спектрального интервала.

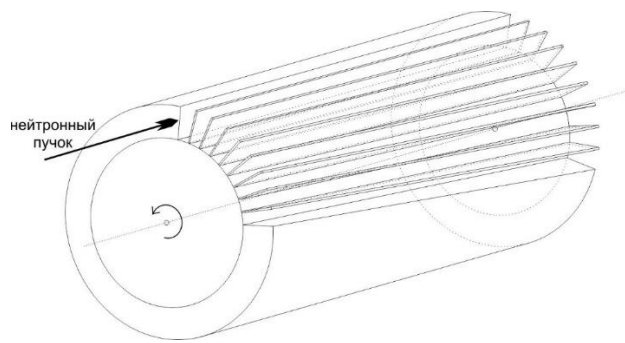


Рисунок 3.1.2.2. Механический фильтр нейтронного пучка с временной фокусировкой. Конфигурация каналов может быть подобрана таким образом, чтобы нейтроны, излученные в определенный интервал времени, могли проходить через каналы фильтра, остальные же поглощались.

Кроме того, данное изобретение может быть применено на постоянных источниках нейтронов для организации времяпролетной методики измерений.

На основании изложенной концепции был спроектирован и изготовлен механический фильтр нейтронной пучка.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Протокол испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.2 Протокол испытаний.pdf](#)
- Программа и методика испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.2 Программа и методика испытаний.pdf](#)
- Акт испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.2 Акт испытаний.pdf](#)
- Акт изготовления. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.2 Акт изготовления.pdf](#)

3.1.3 Расчет конфигурации нейтронной системы рефлектометра для импульсного источника нейтронов моделированием методом Монте-Карло с применением программного пакета VITESS Mc Stas. Разработка математической модели нейтронной системы рефлектометра.

Введение

В нейтронной рефлектометрии цель эксперимента заключается в том, чтобы измерить коэффициент отражения R нейтронов от образца в зависимости от переданного импульса q . Характерная величина для этого коэффициента имеет в среднем величину 10^{-3} . На современных установках эта величина может достигать уровня 10^{-5} и ниже. Поэтому особое внимание должно быть уделено проблеме фонового излучения и проведение оптимизаций для его уменьшения. В связи с этим, должна быть решена задача по поиску оптимального размера замедлителя (или окна, через которое нейтроны вылетают из замедлителя). Если размер или его окно будет превышать область, из которой нейтроны гарантировано попадают в место установки образца, то такие нейтроны будут рассеяны на разных узлах инструмента, что с большой вероятностью приведет к их попаданию в детекторную систему. Часть этих нейтронов будет поглощена с выделением гамма излучения, которое также может быть задетектировано системой набора данных, хоть и с малой эффективностью. Но если брать во внимание требуемый для измерения уровень коэффициента отражения 10^{-5} , то и это может быть источником искажений, получаемых данных.

Оптимизация параметров нейтронной системы рефлектометра

Для определения оптимального размера окна замедлителя требуется выяснить геометрические параметры и покрытие нейтронной оптики, расстояние от замедлителя до ее начала. В свою очередь параметры оптики должны быть определены из размеров образца, требуемого спектра пучка нейтронов и его расходимости.

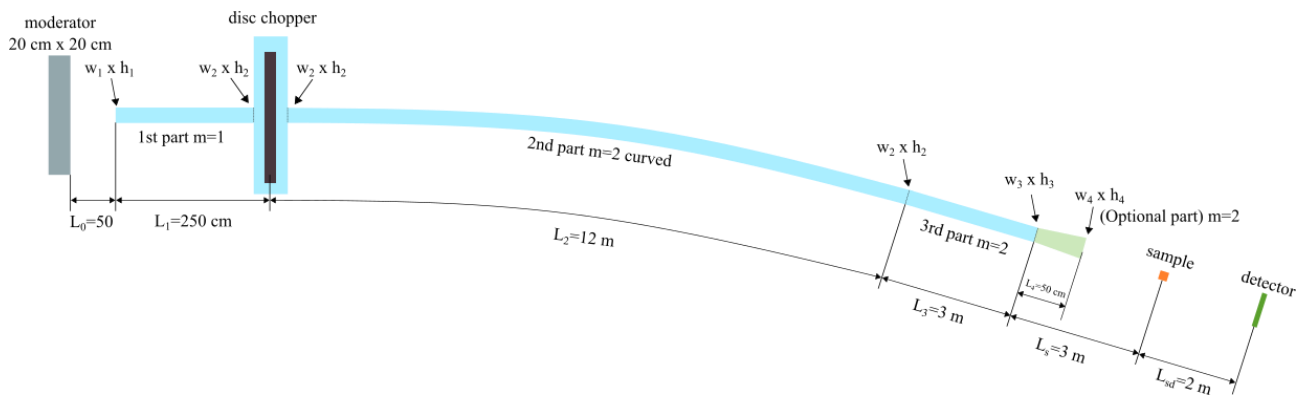


Рисунок 3.1.3.1. Общая схема рефлектометра. Вид сверху. Нейтронная система состоит из трех частей: линейная с $m = 1$, изогнутая $m = 2$, линейная $m = 2$. Линейные части используются для получения равномерного пучка вдоль горизонтальной плоскости. Зеленым цветом в окончании оптики изображена дополнительная (опциональная) секция для измерений с меньшим угловым разрешением.

Для определенности будем рассматривать рефлектометр в вертикальной геометрии (плоскость образца располагается вертикально, отражение происходит в горизонтальной плоскости) (рис. 3.1.3.1). В таком случае пучок должен быть узким, вытянутым по вертикали. Образец для нейтронной рефлектометрии может быть абсолютно разных размеров ($25 \times 25 \text{ мм}^2$, $5 \times 50 \text{ мм}^2$, $70 \times 100 \text{ мм}^2$), разной формы. Поэтому имеет смысл взять некий средний размер, допустим квадрат со стороной $s = 50 \text{ мм}$. Ширина падающего пучка должна определяться из угла скольжения нейтронов и ширины образца. Опять же, угол скольжения в конкретном эксперименте может быть разным: от единиц миллирадиан до десятков и даже сотен, поэтому необходимо взять некое типичное значение. Предположим угол скольжения $\theta = 30 \text{ мрад}$, угловое разрешение 5%, соответственно расходимость пучка $\theta_{res} = \pm 1.5 \text{ мрад}$ вдоль плоскости отражения. Таким образом для того, чтобы падающий пучок нейтронов полностью попадал на образец, его размер по горизонтали должен быть 1.5 мм. Если падающий на образец пучок нейтронов будет шире, то будет происходить рассеяние нейтронов на держателе образца и (или) системы окружения образца, что определенно приведет к повышению фонового излучения, попадающего в детектор.

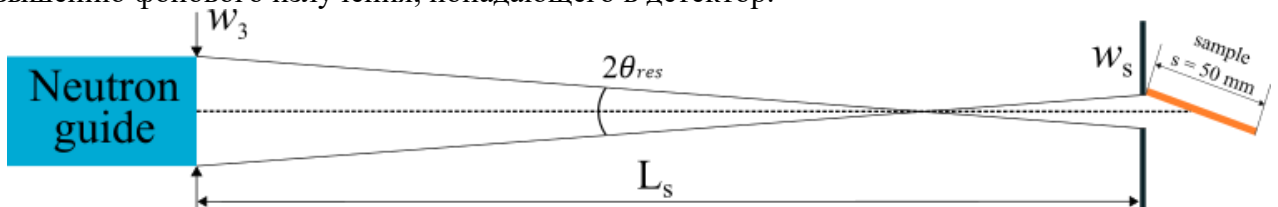


Рисунок 3.1.3.2. Ширина выходного окна зависит от размера образца и требуемого углового разрешения.

На пути нейтронов от окончания нейтронной оптики до образца могут быть установлены другие элементы установки: спин-флиппер, анализатор поляризации пучка, коллимационные щели, и др. Для этого расстояние от окончания оптики до положения образца L_s будет иметь величину 3 метра. Будем считать, что расходимость пучка будет задаваться с помощью двух щелей: первая установлена вблизи окончания оптики, вторая вблизи исследуемого образца. Очевидно, что для минимизации возможного фона от перерассеянных или поглощенных нейтронов размер щелей должен соответствовать размерам ширины нейтронвода w_{NG} и эффективной ширины образца (foot print) w_s (рис. 3.1.3.2). И их размеры должны соответствовать требованиям к расходимости пучка θ_{res} :

$$\frac{w_3 + w_s}{2L_s} = \theta_{res}. \quad (3.1.3.1)$$

Таким образом оптимальная ширина выходного окна нейтронвода будет определяться как:

$$w_3 = 2L_s\theta_{res} - w_s. \quad (3.1.3.2)$$

При параметрах, предложенных ранее, w_3 имеет величину 7.5 мм. Высоту выходного окна предлагается определить через критический угол отражения (рис. 3.1.3.3). Центральная часть нейтроновода будет изогнутой в горизонтальной плоскости, для того чтобы избавиться от прямой видимости поверхности замедлителя и быстрых нейтронов (менее 1 Ангстрема). В качестве внутренней отражающей поверхности предлагается использование суперзеркал с качеством отражающей поверхности $m = 2$. В этом случае для нейтронов 1 ангстрем критический угол отражения $\gamma_{crit} = 3.46$ мрад. То есть после прохождения изогнутой части нейтроновода, оставшиеся нейтроны будут гарантировано отражаться от стенок при углах скольжения, не превышающих γ_{crit} (в зависимости от длины волны). Тогда высота выходного окна нейтроновода будет определяться следующим образом:

$$h_3 = 2\gamma_{crit}L_s + h_s. \quad (3.1.3.3)$$

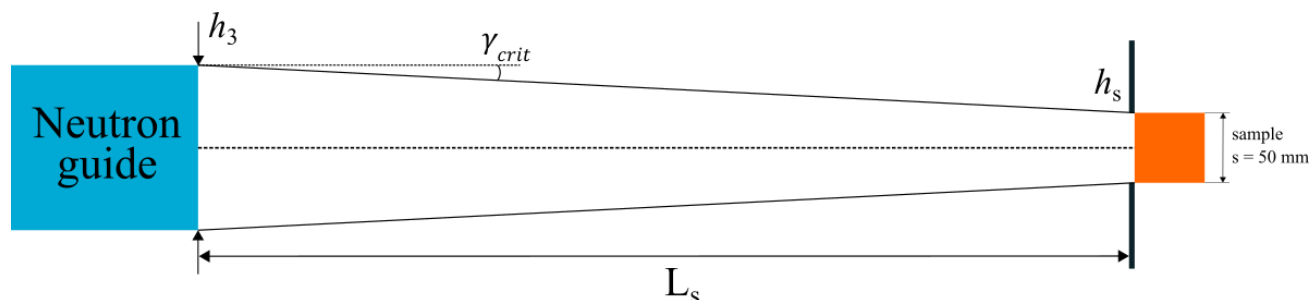


Рисунок 3.1.3.3. Высота выходного окна зависит от размера образца и качества покрытия m . Характеристическая длина волны нейтроновода ≈ 1 ангстрем.

Теперь, зная размеры выходного окна нейтроновода можно проводить дальнейшую оптимизацию системы методом Монте-Карло, изменяя его геометрию. Для этого можно использовать два варианта дальнейшего моделирования:

- 1) Установить источник нейтронов в месте расположения образца и использовать метод обратных лучей. Таким образом, меняя конфигурацию нейтроновода и отслеживая пятно пучка нейтронов и его интенсивность в области замедлителя можно определить оптимальный размер замедлителя (окна замедлителя) и конфигурацию нейтроновода.
- 2) Установить источник нейтронов там, где он и предполагается на установке. Меняя конфигурацию нейтроновода отслеживать интенсивность потока нейтронов на образце, определяя при каких параметрах достигается максимальное значение.

Однако, оба перечисленных варианта содержат в себе большое количество параметров, которыми будет описываться геометрия нейтроновода. Например, его сечение может быть варьировемым, геометрия отражающей поверхностью в некоторых областях или полностью может иметь разные формы: параболическая, эллиптическая, сходящаяся и т.д. Тем не менее, размер замедлителя должен зависеть от размера входного окна оптической системы. Оптимальный размер замедлителя с точки зрения минимизации количества нейтронов, которые будут поглощены нейтроноводом предлагается определить через критический угол для характеристической длины волны нейтроновода.

Второй способ может быть также полезен для оценки потока нейтронов, который попадает «мимо» образца, в держатель образца или другие узлы, составляющие общую систему окружения образца. В таком случае будет полезно определить в каком отношении соотносятся попадающий на образец пучок и пролетающий «мимо», переходящий потом в фоновое излучение, ухудшая статистический набор данных.

Моделированием методом Монте-Карло с применением программного пакета VITESS

Общая пролетная база замедлитель – детекторная система должна иметь величину около 23 метров (рис. 3.1.3.1). Предполагается, что минимально доступное расстояние, на котором можно установить нейтронный оптический канал будет иметь величину 50 см. На таком расстоянии от

источника нейтронов затруднительно использовать суперзеркальные секции в силу высокой интенсивности радиационного излучения, которое за непродолжительное время приведет в негодность такие секции. Возможным вариантом может быть использование цельнометаллических полированных секций, например, из никеля. В этом случае качество отражающей поверхности будет иметь величину $m \approx 1$. Дисконный прерыватель пучка расположен на расстоянии 3 метра от поверхности замедлителя. Затем следует изогнутая часть нейтронвода длиной 12 метров и качеством отражающей поверхности $m = 2$. Использование изогнутой части приводит к «прижиманию» пучка к внешней стенке, то есть пучок становится неравномерным в горизонтальной плоскости. Поэтому должна быть установлена линейная часть после изогнутой для выравнивания интенсивности пучка вдоль горизонтальной плоскости. Длина такой линейной части 3 метра с качеством отражающей поверхности $m = 2$. Входные и выходные окна линейной частей нейтронвода могут иметь разные размеры, что в определенных случаях может приводить к увеличению выходной интенсивности на выходе. Используемые размеры окон разных частей нейтронвода указаны в таблице 3.1.3.1. Используемые обозначения отображены на рис. 3.1.3.1.

Вариант	L_0 , см	$w_1 \times h_1$, мм ²	L_1 , м	$w_2 \times h_2$, мм ²	L_2 , м	R_{curv} , м	L_3 , м	$w_3 \times h_3$, мм ²	Опционально (разрешение 10%) L_4 , см	Опционально (разрешение 10%) $w_4 \times h_4$, мм ²
1	50	7.5×70	2.5	7.5×70	12	2400	3	7.5×70	50	13.5×70
2	50	9×70	2.5	9×70	12	2000	3	7.5×70	50	13.5×70
3	50	9×80	2.5	9×80	12	2000	3	7.5×80	50	13.5×80
4	50	10×80	2.5	10×80	12	1800	3	7.5×80	50	13.5×80
5	50	12×90	2.5	12×90	12	1500	3	7.5×90	50	13.5×90
6	50	20×110	2.5	12×90	12	1500	3	7.5×90	50	13.5×90

Таблица 3.1.3.1. Параметры различных конфигураций нейтронводной системы. Зеленым цветом обозначены опциональные варианты. Желтым выделена конфигурация, в которой первая линейная часть нейтронвода имеет входное окно больше выходного.

Всего было смоделировано 12 различных конфигураций способом №2. Результаты проведенного моделирования представлены на рис. 3.1.3.5. Опционально предлагается использовать дополнительную линейно расходящуюся 4 часть нейтронвода с возможностью быстрого монтажа для измерений с меньшим угловым разрешением. В таблице 3.1.3.1 параметры этой части нейтронвода отображены в зеленых клетках. В таком случае расстояние от выхода нейтронвода до образца сокращается с $L_s = 3$ метров до $L_s' = 2.5$ и итоговое угловое разрешения будет следующим:

$$\frac{w_4 + w_s}{2L_s'} = \theta'_{res}. \quad (3.1.3.4)$$

При $w_4 = 13.5$ мм и $w_s = 1.5$ мм, $\theta'_{res} = 3$ мрад, что составляет величину 10% для угла скольжения образца $\theta = 30$ мрад.

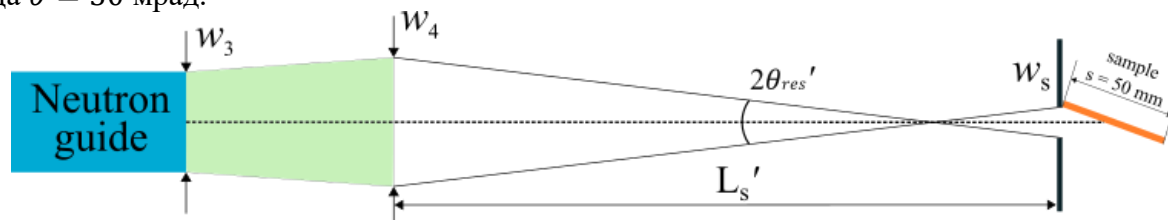


Рисунок 3.1.3.4. Схема окончания нейтронводной системы с дополнительной секцией для измерений с меньшим угловым разрешением.

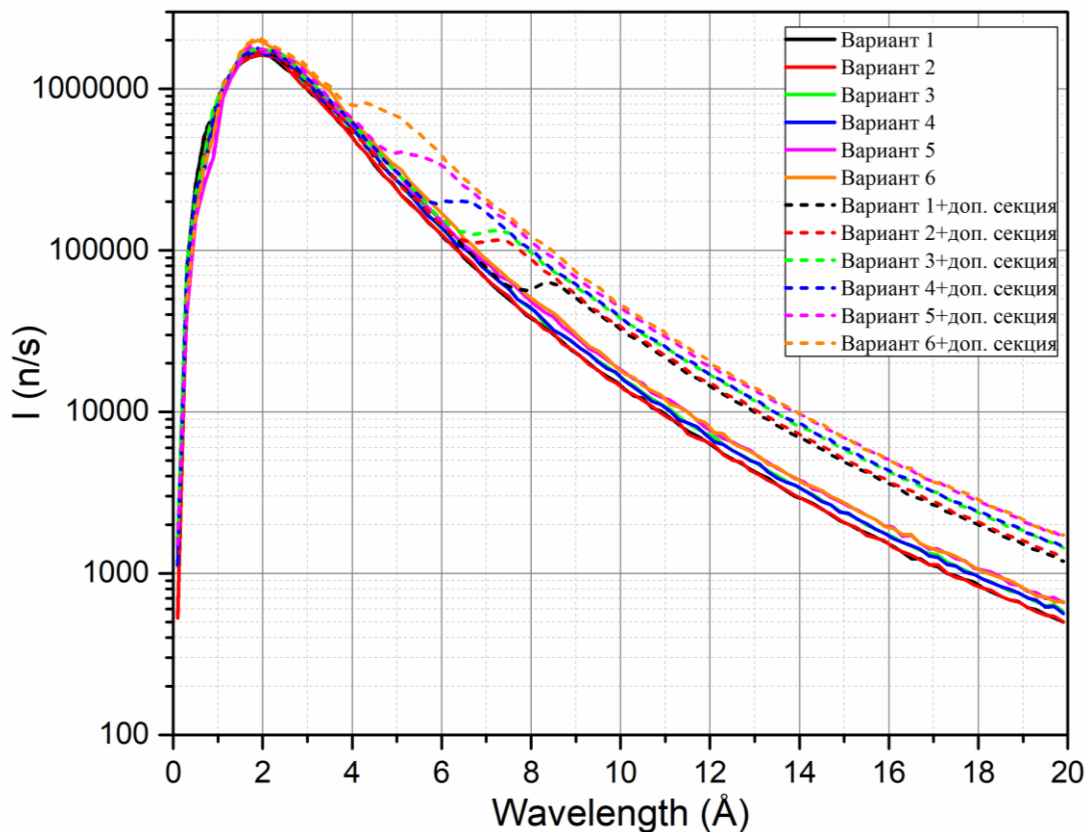


Рисунок 3.1.3.5. Результат Монте-Карло моделирования нейтронной системы при различных параметрах (табл. 3.1.3.1). Измерение интенсивности проводилось в месте установки образца и с площади, соответствующей полному перекрытию пучка образцом (foot print).

Также было проведено измерение интенсивности пучка нейтронов, который пролетает мимо образца. Отношение интенсивностей пучка, формирующего в дальнейшем фон (не попадающего на образец) и пучка, попадающего на образец представлено на рис. 3.1.3.6. В таблице 3.1.3.2 представлены интегральные значения интенсивности для обоих пучков.

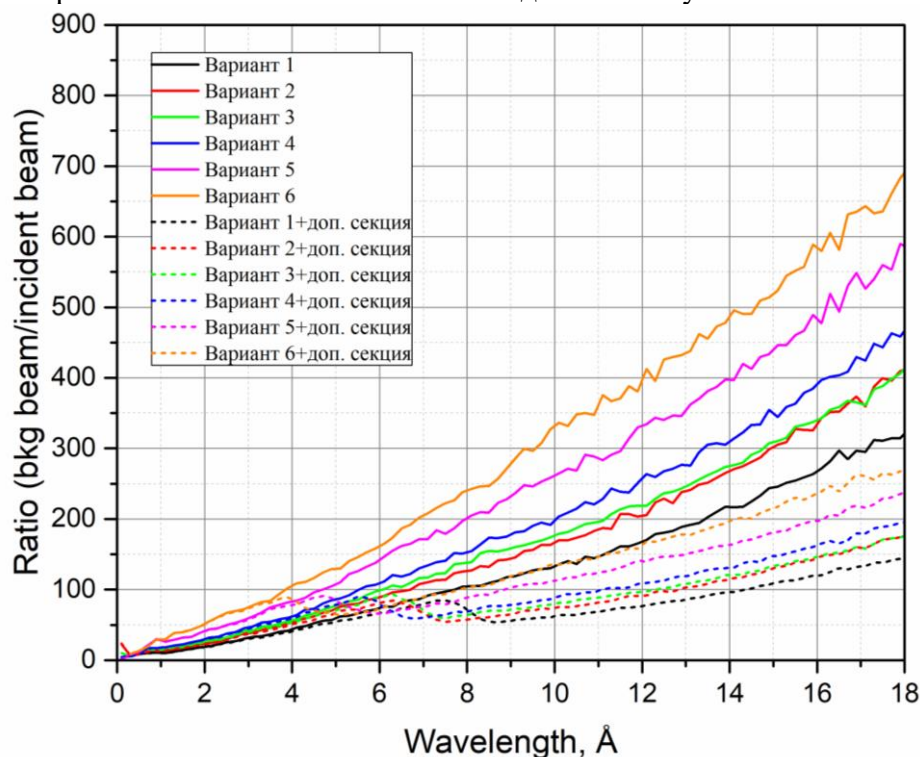


Рисунок 3.1.3.6. Полученные отношения интенсивностей пучков, падающих на образец (incident beam) и пролетающих мимо (bkg beam) в результате Монте-Карло моделирования нейтроноводной системы при различных параметрах (табл. 3.1.3.1). Измерение интенсивности проводилось в месте установки образца, с вычетом той области, которую перекрывает образец.

	Интенсивность падающего на образец пучка, н/с	Относительная интенсивность падающего на образец пучка (по отношению к Вар. №1), %	Интенсивность пучка, вне образца, н/с	Относительная интенсивность пучка вне образца (по отношению к падающему на образец пучку)
Вариант 1	2.26e7	100	6.84e8	30.03
Вариант 1 + доп. секция	2.47e7	109.3	7.07e8	28.62
Вариант 2	2.25e7	99.6	8.35e8	37.11
Вариант 2 + доп. секция	2.49e7	110.2	8.63e8	34.66
Вариант 3	2.4e7	106.2	9.9e8	41.25
Вариант 3 + доп. секция	2.65e7	117.3	1.02e9	38.50
Вариант 4	2.37e7	104.9	1.11e9	46.84
Вариант 4 + доп. Секция	2.66e7	99.6	1.14e9	42.86
Вариант 5	2.42e7	107.1	1.55e9	64.05
Вариант 5 + доп. Секция	2.81e7	124.3	1.6e9	56.94
Вариант 6	2.67e7	118.1	2.09e9	78.28
Вариант 6 + доп. Секция	3.28e7	145.1	2.15e9	65.55

Таблица 3.1.3.2. Интенсивности пучков, при различных конфигурациях нейтроноводной системы.

Результаты

Полученные результаты моделирования в целом демонстрируют выигрыш от увеличения размера сечения нейтронной оптики и использования линейно сходящихся/расходящихся секций (до 45% в случае варианта 6 с дополнительной секцией и варианта 1). Однако в следствие таких изменений конфигурации нейтроноводной системы, увеличивается количество нейтронов, пролетающих мимо образца, ухудшая фоновые условия для измерений. Причем количество этих нейтронов увеличивается сильнее, чем тех, которые попадают на образец. Например, в случае варианта 6 с дополнительной секцией и варианта 1, интенсивность пучка, пролетающего мимо образца, увеличивается более чем в два раза, а выигрыш падающего на образец пучка составил около 45 процентов. Поэтому, необходимо определить их допустимое соотношение. Также было бы не лишним оценить возможный поток перерассеянных нейтронов в область измерения отраженного пучка. Данные оценки позволяют грамотно спроектировать систему защиты от фоновых нейтронов, которая позволит добиться измерений образцов с уровнем коэффициента отражения 10^{-5} и ниже.

3.1.4 Создание прототипа регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее $100 \times 100 \text{ мм}^2$, пространственным разрешением не хуже $1.5 \times 1.5 \times 0.05 \text{ мм}^3$ (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ) и проведение его испытаний

В ходе работ по проекту на третьем этапе проведены работы для создания прототипа регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее $100 \times 100 \text{ мм}^2$, пространственным разрешением не хуже $1.5 \times 1.5 \times 0.05 \text{ мм}^3$.

Цель выполнения работы: создать прототип регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее $100 \times 100 \text{ мм}^2$, пространственным разрешением не хуже $1.5 \times 1.5 \times 0.05 \text{ мм}^3$.

Прототип регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее $100 \times 100 \text{ мм}^2$, пространственным разрешением не хуже $1.5 \times 1.5 \times 0.05 \text{ мм}^3$ был создан на основании разработанного комплекта конструкторской документации с учетом требований стандартов ЕСКД ГОСТ 2.102-2013.

Комплект КД представлен в документации промежуточного отчета 3 этапа в составе:

- сборочный чертеж;
- чертеж общего вида;
- габаритный чертеж;
- ведомость покупных изделий для сборки детекторной системы;
- пояснительная записка;
- чертежи деталей прототипа.

Изготовление прототипа регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее $100 \times 100 \text{ мм}^2$, пространственным разрешением не хуже $1.5 \times 1.5 \times 0.05 \text{ мм}^3$ подтверждается Актом изготовления, который входит в состав документации промежуточного отчета 3 этапа. На рис. 3.1.4.1 представлен прототип регистрирующего газоразрядного модуля в собранном виде.

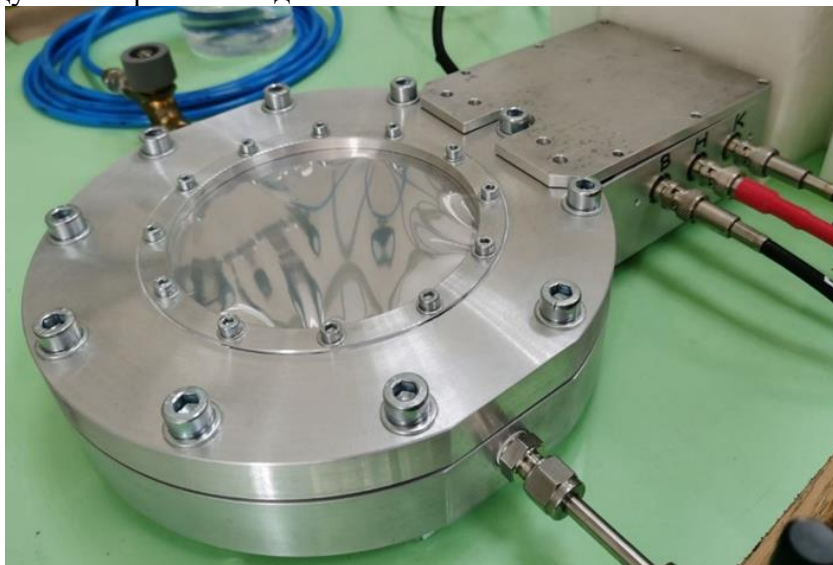


Рисунок 3.1.4.1. Прототип газоразрядного модуля с активной площадью $100 \times 100 \text{ мм}^2$.

Была проведена проверка параметров прототипа регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером в соответствии с Программой испытаний и методикой испытаний ПРГМ.01.00.00.000 ПМ, представленной в составе документации промежуточного отчета 3 этапа.

Для проверки работоспособности прототипа газоразрядного модуля с твердотельным конвертером были проведены испытания на гамма источнике ^{55}Fe и альфа источнике ^{234}U для прототипа с размером активной площади $100 \times 100 \text{ мм}$. Для наполнения прототипа использовалась газовая смесь $90\% \text{Ar} + 10\% \text{CO}_2$. В результате проведенных испытаний были получены

энергетические спектры (рис. 3.1.4.2, 3.1.4.3), подтверждающие работоспособность конструкции прототипа, что позволит обеспечить требуемое пространственное разрешение $1.5 \times 1.5 \times 0.05$ мм.

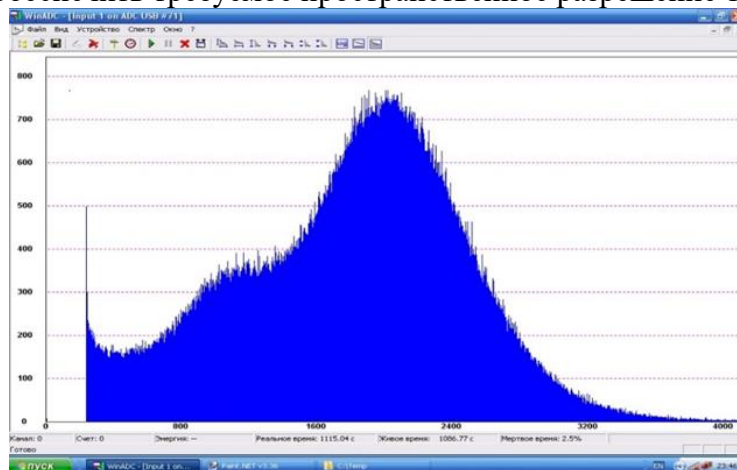


Рисунок 3.1.4.2. Энергетический спектр на гамма источнике ^{55}Fe для газовой смеси 90%Ar+10%CO₂.

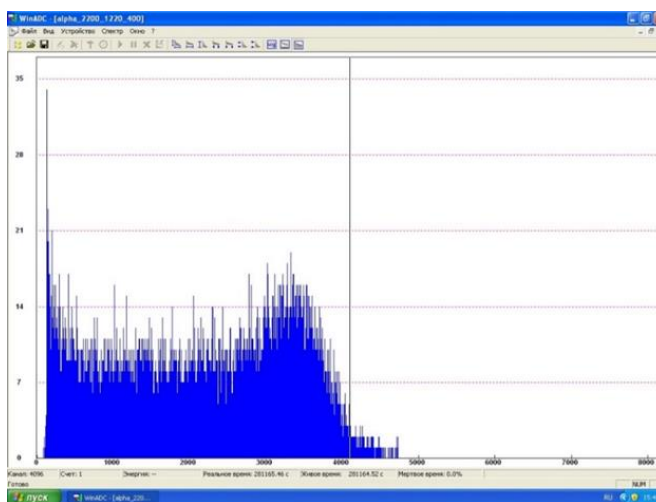


Рисунок 3.1.4.3. Энергетический спектр на альфа источнике ^{234}U для газовой смеси 90%Ar+10%CO₂.

Измерения на прототипе газоразрядного модуля 100×100 мм проводились в соответствии со следующим алгоритмом:

1) Измерялся энергетический спектр гамма источника с энергией фотонов 5.9 Кэв ^{55}Fe на газовой смеси 90%Ar+10%CO₂. Выбрана оптимальная рабочая газовая смесь по максимальному амплитудному разрешению.

2) Регистрировался сигнал на аноде, находящемся под нулевым потенциалом через сопротивление 100 кОм. Ориентировочные напряжения на дрейфовом катоде -2000, на котором на сторону, обращенную к верхней плоскости THGEM (-) нанесен конвертер 10В₄С толщиной 1 мкм; верхняя плоскость THGEM (-) -1500 В, нижняя плоскость THGEM (+) -400 В.

3) Измерялось парное разрешение по координатам и абсолютные координаты в плоскостях X, Y на источнике ^{55}Fe .

4) Измерялось парное разрешение по координатам и абсолютные координаты в плоскостях X, Y на источнике тепловых нейтронов.

В результате испытаний на источнике тепловых нейтронов было выявлено, что если координатное разрешение в горизонтальной плоскости требуется лучше, чем заявленное 1.5×1.5 мм, то в этом случае следует использовать конвертор, нанесенный на дрейфовый катод на основе 10В₄С, с напыленным титаном (Ti) на внешнюю поверхность конвертора, обращенную к верхней плоскости THGEM (-). На рис. 3.1.4.4 демонстрируется улучшение пространственного разрешения в

горизонтальной плоскости в зависимости от толщины слоя напыления Ti на конвертер $^{10}\text{B}_4\text{C}$, нанесенного на дрейфовый катод и обращенного к верхней плоскости THGEM (-).

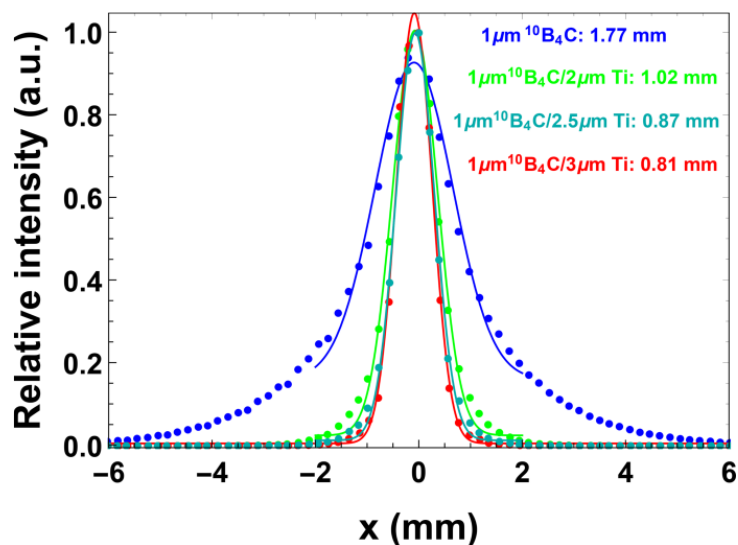


Рисунок 3.1.4.4. Улучшение пространственного разрешения в зависимости от увеличения толщины слоя напыления Ti на конвертер $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

Испытания прототипа регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее $100 \times 100 \text{ мм}^2$, пространственным разрешением не хуже $1.5 \times 1.5 \times 0.05 \text{ мм}^3$, проведенные согласно пунктам Программы испытаний и методики испытаний, подтверждают, что изделие является работоспособным и может использоваться для проведения исследовательских работ.

Было установлено, что объект испытания прототип регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее $100 \times 100 \text{ мм}^2$, пространственным разрешением не хуже $1.5 \times 1.5 \times 0.05 \text{ мм}^3$ соответствует параметрам, обозначенным в Техническом задании, а именно:

- прототип собран согласно требованиям конструкторской документации на прототип регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее $100 \times 100 \text{ мм}^2$, пространственным разрешением не хуже $1.5 \times 1.5 \times 0.05 \text{ мм}^3$;
- активная площадь прототипа составляет $100 \times 100 \text{ мм}^2$;
- пространственное разрешение прототипа не хуже $1.5 \times 1.5 \times 0.05 \text{ мм}^3$.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Комплект конструкторской документации с учетом требований стандартов ЕСКД ГОСТ 2.102–201, включающий сборочный чертеж, чертеж общего вида, габаритный чертеж, ведомость покупных изделий для сборки детекторной системы, пояснительную записку, чертежи деталей прототипа. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.4. Комплект констр докум.pdf](#)
 - Программа испытаний и методика испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.4. Программа и методика испытаний.pdf](#)
- а также в составе документов, представленных в заключительном отчете 3 этапа:
- Акт изготовления. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.4. Акт изготовления.pdf](#)
 - Акт испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.4. Акт испытаний.pdf](#)
 - Протокол испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.4. Протокол испытаний.pdf](#)

3.1.5 Разработка программного решения для определения координаты конверсии нейтрона на площади двумерного позиционно-чувствительного детектора нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/⁶LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ)

В ходе работ по проекту на третьем этапе была проведена разработка программного решения для определения координаты конверсии нейтрона вдоль одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/⁶LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей, а также режекции гамма-фона с целью обеспечения существенного улучшения сигнал/шум.

Цель выполнения работы: разработать программное обеспечение, позволяющее определить координаты конверсии нейтрона вдоль одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/⁶LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей, а также программную документацию. Работа выполнена согласно п. 3.1.5 ПГ и п. 2.2, п. 3.2.2 ТЗ.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Текст программы по ГОСТ 19.401-78. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.5. Текст программы.pdf](#)
- Описание применения. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.5. Описание применения.pdf](#)
- Руководство системного программиста по ГОСТ 19.505-79. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.5. Руководство системного программиста.pdf](#)
- Руководство оператора по ГОСТ 19.505-79. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.5. Руководство оператора.pdf](#)

3.1.6 Создание двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200×200 мм² с пространственным разрешением не менее 2×2 мм² с поканальной регистрацией сигнала (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ)

В рамках выполнения проекта на третьем этапе были проведены работы по созданию прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200×200 мм² с пространственным разрешением не менее 2×2 мм² с поканальной регистрацией сигнала.

Цель выполнения работы: создать прототип двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200×200 мм² с пространственным разрешением не менее 2×2 мм² с поканальной регистрацией сигнала.

Прототип двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200×200 мм² с пространственным разрешением не менее 2×2 мм² с поканальной регистрацией сигнала был создан в соответствии с разработанным комплектом конструкторской документации с учетом требований стандартов ЕСКД ГОСТ 2.102-2013.

Комплект КД представлен в документации отчета 3 этапа в составе:

- сборочный чертеж;
- чертеж общего вида;
- габаритный чертеж;
- чертежи сборочных единиц;
- чертежи деталей;
- пояснительная записка.

Изготовление прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200×200 мм² с пространственным разрешением не менее 2×2 мм² с поканальной регистрацией сигнала подтверждается Актом изготовления, который входит в состав документации отчета 3 этапа. На рис. 3.1.6.1 представлен прототип двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры в собранном виде.

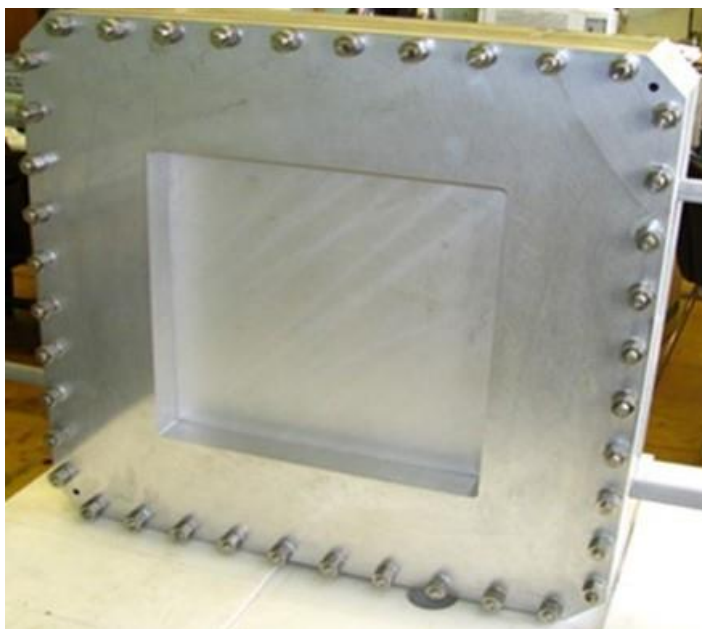


Рисунок 3.1.6.1. Прототип двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры.

Для предварительной подготовки прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры к работе были осуществлены следующие действия:

1. Промывка рамок пакета электродов в ультразвуковой ванне в дистиллированной воде при температуре $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Сушка пакета электродов в термовакуумной камере при температуре $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении $1\text{E-}2$ мбар.
3. Установка пакета электродов в корпус детектора с закорачиванием всех стрипов на «землю».
4. Наполнение камеры чистым азотом, продув 6 объемов камеры, далее постепенная подача высокого напряжения для выгорания мелкой фракции. После окончания процесса происходит падение тока. Для определения предела по высокому напряжению для азота производилось резкое увеличение темнового тока и фиксирование параметра. Затем высокое напряжение было сброшено и проведено переключение на рабочий газ.
5. Продув рабочим газом $70\%\text{Ar}+30\%\text{CO}_2$ 6 объемов камеры.
6. Измерена зависимость темнового тока от высокого напряжения на аноде. Определено максимальное допустимое высокое напряжение для рабочей газовой смеси. Выставлена рабочая точка по высокому напряжению.
7. При облучении удаленным источником рентгеновского излучения ^{55}Fe проведена проверка одноканальным усилителем формирователем сигналов на каждом из 32-х стрипов. Нерабочие стрипы были закорочены на «землю».
8. Съем энергетических спектров на каждом из 32-х рабочих стрипов. Если спектры идентичные, прототип находится в рабочем состоянии и готов к поканальному съему сигналов.

После подготовки прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры была проведена проверка его параметров в соответствии с Программой испытаний и методикой испытаний ДПЧМК.01.00.00.00.000 ПМ, представленной в составе документации отчета 3 этапа.

Для проверки работоспособности прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры были проведены испытания с использованием источника рентгеновского излучения изотопа железо-55 (^{55}Fe). Для наполнения прототипа использовалась газовая смесь $70\%\text{Ar}+30\%\text{CO}_2$. В результате проведенных испытаний был получен энергетический спектр (рис. 3.1.6.2), подтверждающий работоспособность конструкции прототипа, что позволит обеспечить требуемое пространственное разрешение 2×2 мм.

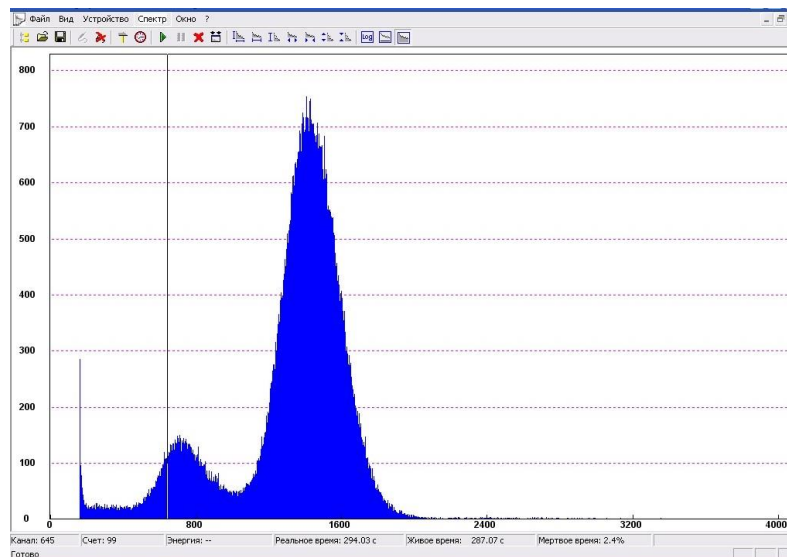


Рисунок 3.1.6.2. Энергетический спектр для прототипа многопроволочной камеры.

Измерения на прототипе двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры проводились в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Для поканального съема сигналов со стрипов с каждого из 32-х стрипов по 16 по плоскостям X-Y снимался сигнал отдельно на каждый канал многоканального усилителя-формирователя.
2. С выходов усилителей-формирователей подавались сигналы канал в канал на входы 32-х АЦП.
3. Засвечивался центр чувствительной зоны 16×16 стрипов коллимированным источником ^{55}Fe . Диаметр коллиматора был ~ 0.9 мм.
4. В результате обработки специализированной программой по координатам X-Y был получен гауссовый сигнал по амплитуде от наведенного источника, центр тяжести является координатой, а сигма распределения – точностью определения координаты.

Испытания прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее $200 \times 200 \text{ мм}^2$ с пространственным разрешением не менее $2 \times 2 \text{ мм}^2$ с поканальной регистрацией сигнала, проведенные согласно пунктам Программы испытаний и методики испытаний ДПЧМК.01.00.00.000 ПМ, подтверждают, что изделие является работоспособным и может использоваться для проведения исследовательских работ.

Было установлено, что объект испытания прототип двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее $200 \times 200 \text{ мм}^2$ с пространственным разрешением не менее $2 \times 2 \text{ мм}^2$ с поканальной регистрацией сигнала соответствует параметрам, обозначенным в Техническом задании, а именно:

- прототип собран согласно требованиям конструкторской документации на прототип двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее $200 \times 200 \text{ мм}^2$ с пространственным разрешением не менее $2 \times 2 \text{ мм}^2$ с поканальной регистрацией сигнала;
- активная площадь прототипа составляет $200 \times 200 \text{ мм}^2$;
- пространственное разрешение прототипа не менее $2 \times 2 \text{ мм}^2$.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Комплект конструкторской документации с учетом требований стандартов ЕСКД ГОСТ 2.102–201. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.6 Комплект констр докум.pdf](#)
- Акт изготовления. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.6 Акт изготовления.pdf](#)
- Программа испытаний и методика испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.6 Программа и методика испытаний.pdf](#)
- Акт испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.6 Акт испытаний.pdf](#)

- Протокол испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.6 Протокол испытаний.pdf](#)

3.1.7 Калибровка детекторов от радиоизотопного источника (совместно с ИЯИ РАН)

Цель калибровки – нормирование детекторов, находящихся на одном кольце для правильной работы дифрактометра в режиме определения текстуры.

Калибровка проводится следующим образом:

- Производится подача питающего напряжения на детекторы и систему измерения.
- Записываются индивидуальные параметры порогов в предусилители для устранения темнового шума детекторов.
- Производится накопление данных в течении 1 минуты для получения параметров темнового шума.
- На месте образца размещается источник нейтронов ^{252}Cf .
- Производится измерения счетов детекторов в течении 10 мин.

Дальнейшая обработка данных состоит в поиске детектора с максимальным счетом на каждом кольце, и расчете корректирующего коэффициента для каждого детектора по формуле (1).

$$K = \frac{N_{max}}{N_{det}} \quad (1)$$

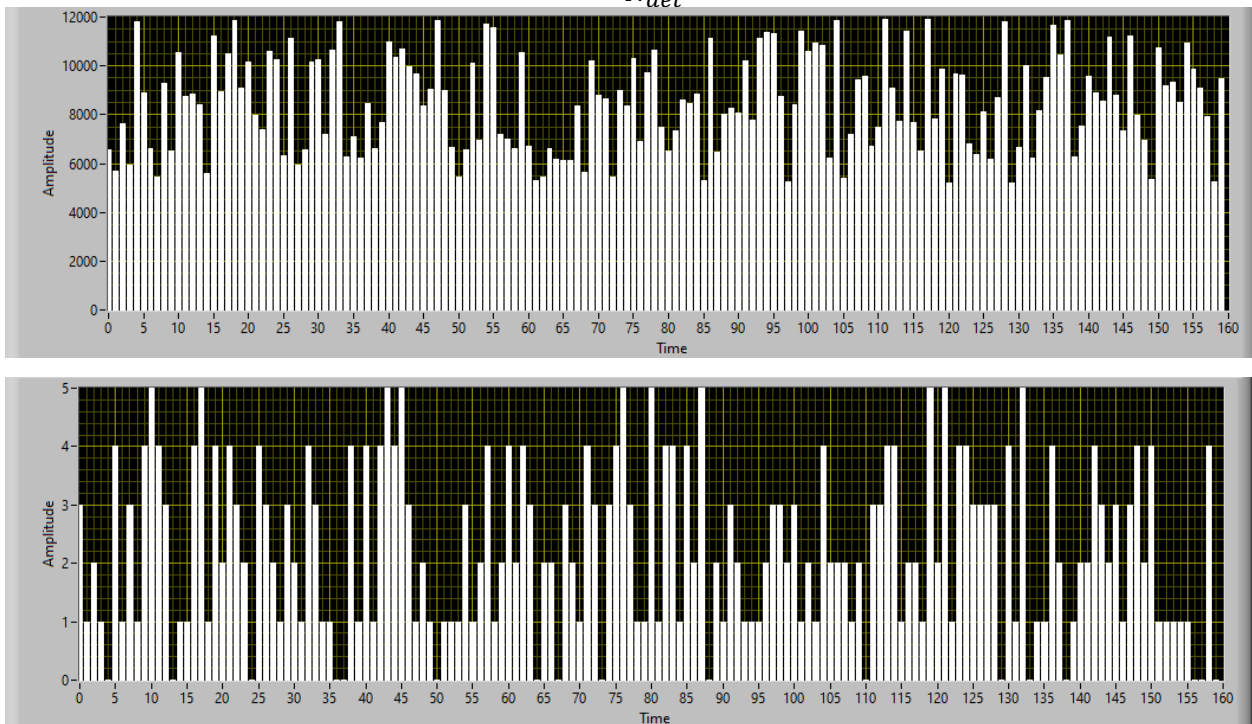


Рисунок 3.1.7.1. Регулирование порогов.

Средний порог составляет 15 мВ. Также по результатам тестирования можно сделать вывод что отклонения эффективности одиночных детекторов составляют максимум 11 %. Это позволяет сделать вывод что детекторы имеют хорошую повторяемость и разброс связан только с неоднородностью сцинтилляционного листа.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Акт калибровки. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.7 Акт калибровки Калибровка детекторов от радиоизотопного источника.pdf](#)

3.1.8 Проведение тестирования параметров детекторов на источнике нейтронов (совместно с ИЯИ РАН)

Также было проведено тестирования параметров детекторов на источнике нейтронов и параметров одиночных детекторов нейтронов входящих в состав детекторной системы нейтронного дифрактометра “СФЕРА”. Для проведения тестирования разработана программа ЛНИ.Э000 ПМ.

Также, в рамках работ по улучшения и тестированию параметров дифрактометра проведено моделирования оптических параметров подобного типа детекторов, и метода определения координаты, основанного на анализе амплитуды сигналов. На рис. 3.1.8.1 показаны моделированные значения количества фотонов, полученных с противоположных кремниевых фотоумножителей для двух рассмотренных оптических моделей [3.1.8.1]. Результаты моделирования показали, что метод позволяет определять координату и его использование в детекторах дифрактометра СФЕРА позволит значительно улучшить вертикальное разрешение.

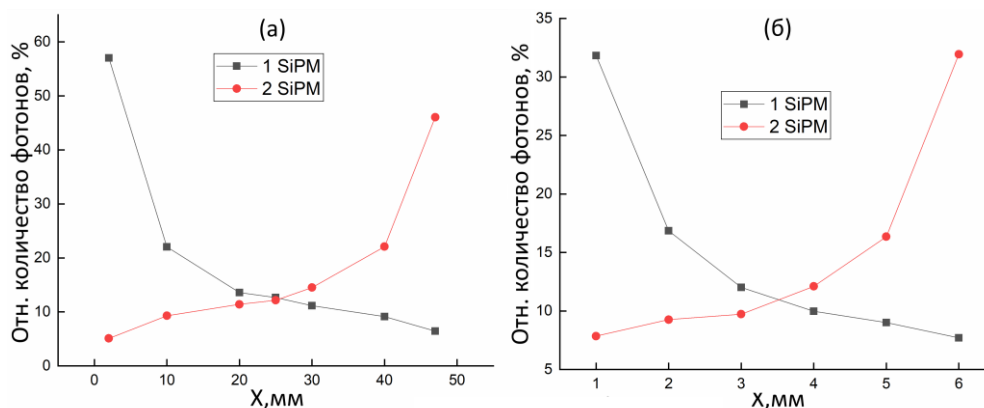


Рисунок 3.1.8.1. Процентное соотношение зарегистрированных фотонов от общего количества фотонов. (а) – первая модель, (б) – вторая модель.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[3.1.8.1] Моделирование оптических параметров сцинтилляционных позиционно-чувствительных детекторов с органическим световодом / Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Р. А. Садыков [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 4. – С. 71-76. – DOI 10.31857/S1028096023040209. – EDN JIJXYR.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Протокол тестирования. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.8 Протокол тестирования.pdf](#)
- Программа тестирования. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.8 Программа тестирования.pdf](#)
- Акт проведения тестирования. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.8 Акт проведения тестирования.pdf](#)

3.1.9 Нейтронные рефлектометрические и дифрактометрические исследования процессов отражения, прохождения нейтронов и генерации вторичного излучения от многослойных наноструктур на основе гадолиния и бора (совместно с ИФМ УРО РАН)

Теоретическое исследование отражения нейтронов от тонких пленок и слоистых наноструктур, содержащих сильнопоглощающие нейтроны изотопы гадолиния и бора

Важное, активно развивающееся в последнее время направление исследований – использование сильнопоглощающих нейтроны изотопов для создания твердотельных детекторов нейтронов. Такие устройства представляют большой интерес для применения ввиду дефицита изотопа ^3He , на основе которого обычно изготавливаются газовые детекторы нейтронов. Изотопы с сильным резонансным поглощением нейтронов предоставляют также уникальную возможность -

плотность длины рассеяния нейтронов можно изменять контролируемым образом прямо в ходе эксперимента, варьируя длину волны нейтронов. Это можно использовать для решения фазовой проблемы, вводя в исследуемые образцы опорный слой, содержащий изотопы с резонансным поглощением.

Практически во всех веществах поглощение тепловых нейтронов незначительно, но для некоторых изотопов оно существенно. Например, два изотопа гадолиния, ^{155}Gd и ^{157}Gd имеют очень большие сечения захвата тепловых нейтронов. Благодаря присутствию этих изотопов в природном гадолинии, его сечение захвата также значительно. Большие величины сечений связаны с наличием в ядрах упомянутых изотопов состояний, с характерной энергией перехода, лежащей в диапазоне энергий тепловых нейтронов. В результате возникает резонансное взаимодействие ядра с тепловым нейтроном, следствием которого является очень высокая вероятность поглощения нейтрона ядром с последующим испусканием гамма-кванта. Это обусловило широкое применение гадолиния в ядерной энергетике, как экранирующего выгорающего поглотителя нейтронов.

Возможно применение этого уникального свойства гадолиния и в научных исследованиях, где применяются тепловые нейтроны, в частности, в нейтронной рефлектометрии. Изучение поглощения нейтронов одновременно с отражением и генерацией вторичного излучения существенно расширяет возможности диагностики и, потому, представляет большой интерес. Но процессы распространения нейтронов в сильнопоглощающих средах слабо изучены и работ по этой тематике не очень много. Группа из Петербургского института ядерной физики (г. Гатчина) исследовала поглощающие свойства гадолиния в целях оптимизации суперзеркал на их основе [3.1.9.1]. В Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна) также проводились теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия медленных нейтронов с гадолинием, определена постоянная составляющая действительной части длины рассеяния [3.1.9.2]. Франк [3.1.9.3] получил общее выражение для комплексного показателя преломления нейтронов в средах с поглощением. Также было предсказано необычное поведение эффективного сечения взаимодействия при уменьшении скорости падающих нейтронов [3.1.9.4]. К сожалению, эти результаты не получили широкой известности.

Две независимые группы из Национального института стандартов и технологий (NIST) [3.1.9.5] и Делфтского технологического университета (Нидерланды) [3.1.9.6] показали возможность решения фазовой проблемы в нейтронной рефлектометрии путем введения в исследуемый образец опорного слоя, характеристики которого можно изменять в процессе измерений. В этих исследованиях использовался магнитный опорный слой, его характеристики изменялись путем приложения магнитного поля, но сам образец не должен быть магнитным, иначе его характеристики также изменятся.

В дальнейшем этот подход был модифицирован – в качестве материала опорного слоя использовался природный гадолиний. Благодаря резонансному поглощению в слоях гадолиния, его нейтронооптические характеристики можно изменить, меняя длину волны нейтронного пучка. При комнатной температуре гадолиний парамагнитен, что позволяет исследовать образцы с приложением магнитного поля, так как оно не меняет длины рассеяния нейтронов в слоях гадолиния. Методика была апробирована как путем теоретических расчетов [3.1.9.7], так и экспериментально [3.1.9.8].

Сильнопоглощающие вещества, типа Gd или соединений бора, обогащенных изотопом ^{10}B , могут быть использованы в качестве материалов для твердотельных детекторов нейтронов. В настоящее время детекторы наполняются изотопом ^3He . При попадании в него нейтрона происходит реакция с образованием заряженных частиц - тритона и протона - которые регистрируются газовым счетчиком. Но гелий-3 - достаточно дорогой изотоп, его запасы в мире малы. Поэтому во многих нейтронных центрах, например, институте Лауэ-Ланжевена, сейчас возникает интерес к твердотельным детекторам на основе материалов с сильным поглощением тепловых нейтронов [3.1.9.9]. Гадолиний может быть достаточно перспективным веществом для развития данного направления. Зависимость поглощения от длины волны, вероятно, может быть использована для создания энергодисперсионного детектора.

Кроме того, тонкие пленки гадолиния используются и в нейтронных поляризаторах и учет процессов поглощения нейтронов необходим для точного расчета параметров таких устройств. В Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна) были проведены эксперименты по определению длины когерентного рассеяния в Gd [3.1.9.10], но точность этих данных может быть повышена путем проведения одновременных измерений отражения и поглощения в структурах с гадолинием. Сильнопоглощающие вещества типа гадолиния необходимы и для реализации метода нейтронной рефлектометрии с регистрацией вторичного излучения [3.1.9.11].

Соответственно, актуальность исследований сильнопоглощающих систем предопределяется востребованностью результатов как для создания приборной базы для нейтронных инструментов, так и для развития методов анализа экспериментальных данных. Резонансное поглощение нейтронов, например, изотопами гадолиния, сопровождается генерацией вторичного излучения, детектирование которого открывает новые возможности в развитии методов нейтронной нанодиагностики.

В данном разделе приводятся результаты изучения процессов отражения и прохождения нейтронов, а также генерации вторичного излучения в многослойных системах, содержащих слои из сильнопоглощающих веществ (природный гадолиний или карбид бора B_4C). Метод фазово-амплитудных функций адаптирован для расчета коэффициента прохождения нейтронов, что дает возможность сразу определить коэффициент поглощения и плотность вероятности обнаружения нейтронов на различных глубинах. Все расчеты можно проводить и в случае рассеяния поляризованных нейтронов магнитными наноструктурами. Для анализа различных ситуаций используются модельные численные эксперименты. Полученные результаты дадут возможность оптимального выбора сильнопоглощающих систем для различных задач, как прикладных, так и научных.

Теория

Метод фазово-амплитудных функций является подходом для решения широкого круга квантово-механических задач. В его основе лежит представление о так называемой фазовой функции $\alpha(r)$, которая имеет простой и наглядный физический смысл [3.1.9.12]. При заданном центральном потенциале значение этой функции в некоторой точке r является фазой рассеяния на части потенциального барьера, заключенного в сфере радиуса r . Фаза рассеяния α на всем потенциальном барьере определяется как предел $\alpha = \lim_{r \rightarrow \infty} \alpha(r)$. Фазовая функция удовлетворяет дифференциальному уравнению Риккати, которое называется фазовым уравнением. Фазовая функция характеризует эффект действия потенциала и равна нулю, если равен нулю потенциал.

Задача описания отражения нейтронов от металлических пленок представляет собой вариант одномерной задачи о взаимодействии частицы (нейтрона) с потенциальным барьером (ядерной структурой отражающего слоя). Волновое уравнение в этом случае имеет вид:

$$\frac{d^2}{dx^2} \psi(x) + [k^2 - V(x)]\psi(x) = 0. \quad (3.1.9.1)$$

Волновая функция представляется в виде суперпозиции падающей $A(x)$ и отраженной $B(x)$ волн:

$$\psi(x) = A(x)[\exp(ikx) + B(x)\exp(-ikx)]. \quad (3.1.9.2)$$

Подставляя это выражение в уравнение (3.1.9.2) и проведя преобразования [3.1.9.12], можно получить уравнение для амплитуды отраженной волны $B(x)$, имеющее форму фазового уравнения:

$$\frac{d}{dx} B(x) = -\frac{1}{2ik} V(x)[\exp(ikx) + B(x)\exp(-ikx)]^2. \quad (3.1.9.3)$$

Граничное условие $B(0) = 0$, соответствует отсутствию отраженной волны за потенциальным барьером.

Это уравнение не зависит от амплитуды прошедшей волны, поэтому в ряде задач коэффициент прохождения можно не рассчитывать, экономя вычислительные ресурсы. В отличие от исходного уравнения Шредингера, фазовое уравнение является уравнением первого порядка, хотя и нелинейным. Оно не имеет аналитического решения для произвольной функции $V(x)$, но численно решается быстрее и проще, чем уравнение (3.1.9.1). В настоящей работе для решения уравнения (3.1.9.3) использовался неявный метод Рунге-Кутты второго порядка.

В связи с тем, что функция $B(x)$ обладает свойствами фазовой функции из квантовой механики, но, фактически, описывает амплитуду отраженной волны, ее называют фазово-амплитудной функцией.

При непосредственном рассмотрении уравнения (3.1.9.3) предполагают нормальное падение волны на потенциальный барьер, то есть, поток нейтронов должен падать на пленку перпендикулярно ее поверхности. На самом деле рефлектометрия имеет дело со скользящими углами падения. В этом случае в отражении от барьера участвует лишь нормальная составляющая волнового вектора. Тогда в уравнении (3.1.9.3) $k = 2\pi/\lambda \sin \theta$, где θ – угол падения, отсчитанный от поверхности пленки, λ – длина волны нейтронов. Вводя обозначение $k_0 = 2\pi/\lambda$, получим $k = k_0 \sin \theta$. В рефлектометрии также часто используют величину $q = 2k$, которая имеет смысл нормальной компоненты изменения волнового вектора при отражении. В дальнейшем будем использовать именно такую нотацию.

Потенциал взаимодействия $V(x)$ связан с плотностью длины рассеяния следующим соотношением [3.1.9.13]:

$$V(x) = 4\pi[\delta(x) + i\beta(x)]. \quad (3.1.9.4)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \delta(x) &= \text{Re}[N(x)b(x)] \\ \beta(x) &= \text{Im}[N(x)b(x)], \end{aligned} \quad (3.1.9.5)$$

где $b(x)$ – длина ядерного рассеяния нейтронов на глубине x , $N(x)$ – число частиц в единице объема на глубине x . Величина $\delta(x)$ описывает преломление и отражение нейтронов в веществе, $\beta(x)$ – поглощение. Их численные значения для различных материалов и длин волн могут быть найдены в справочных таблицах или на интернет-ресурсах [3.1.9.14], а также рассчитаны самостоятельно. Для большинства веществ $\beta(x) \approx 0$ и потенциал можно рассматривать, как действительный. Но для сильнопоглощающих изотопов величина $\beta(x)$ становится существенной, а потенциал взаимодействия – комплексным. Поэтому в дальнейшем будем считать $V(x)$ только комплексной величиной.

При определении начального условия к уравнению (1.3) предполагали, что слева и справа от потенциального барьера находится вакуум. В случае рефлектометрии это соответствовало бы изолированной пленке. К сожалению, такие пленки слишком тонки, чтобы они могли существовать сами по себе. Их всегда синтезируют на подложках, очень толстых ($\sim 10^{-3}$ м) по сравнению с характерными толщинами пленок ($\sim 10^{-9}$ – 10^{-8} м), и их можно рассматривать как полубесконечную среду с одной стороны пленки. Это приводит к тому, что за исследуемой структурой пленки тоже возникает отраженная от подложки волна, и именно ее амплитуда должна быть взята в качестве граничного условия для уравнения (3.1.9.3).

Амплитуда отражения от поверхности среды описывается формулой Френеля [3.1.9.13]:

$$r_F(k) = \frac{k - \sqrt{k^2 - V(0)}}{k + \sqrt{k^2 - V(0)}}. \quad (3.1.9.6)$$

Тогда начальное условие в уравнении (1.3) для заданного k будет иметь вид $B(k, 0) = r_F(k)$, если отсчет координаты начинается от нуля.

Уравнение для амплитуды прошедшей волны выводится аналогично уравнению (3.1.9.3) и имеет вид:

$$\frac{d}{dx}A(x) = -\frac{1}{2ik}V(x)A(x)[\exp(ikx) + B(x)\exp(-ikx)]. \quad (3.1.9.7)$$

В отличие от (1.3) это уравнение линейно, и можно записать формальное решение для произвольного вида функций $V(x)$ и $B(x)$ через неопределенный интеграл. Но численное решение методом Рунге-Кутты оказывается проще.

В отсутствие подложки граничное условие имеет простой вид $A(0) = 1$. При ее наличии, амплитуда прошедшей волны уменьшается на величину амплитуды многократно отраженной волны на интерфейсе «пленка-подложка». Граничное условие в этом случае выглядит следующим образом:

$$A(k, 0) = 1 - |B(k, 0)|^2. \quad (3.1.9.8)$$

Коэффициенты отражения и прохождения для всей пленки (значения, измеряемые в эксперименте) выражаются через значения функций A и B на поверхности пленки:

$$R(k) = |B(k, x_N)|^2, T(k) = |A(k, x_N)|. \quad (3.1.9.9)$$

Зная вид функций $A(k, x)$ и $B(k, x)$, можно восстановить волновую функцию в зависимости от глубины и волнового числа, используя соотношение (3.1.9.2). Это дает возможность рассчитать плотность вероятности обнаружения нейтрона на любой глубине и решать иные квантовомеханические задачи. Таким образом, метод фазово-амплитудных функций очень удобен для анализа процессов распространения нейтронов в конденсированных средах. Простота используемых уравнений обеспечивает высокую скорость и точность расчетов. В среднем, расчет происходит в 2-3 раза быстрее, чем при использовании других методов: алгоритма Парратта [3.1.9.15], формализма оптических матриц [3.1.9.16], рекуррентных соотношений, предложенных В. К. Игнатовичем [3.1.9.17]

В отличие от ядерного рассеяния нейтронов, взаимодействие поляризованных нейтронов с магнитными моментами атомов является более сложной задачей многоканального рассеяния. Возникает два канала рассеяния – для нейтронов со спином «вверх» и для нейтронов со спином «вниз» (направления выбраны условно). Для упрощения дальнейших выкладок введем обозначения: канал нейтронов со спином «вверх» обозначим знаком «+» (плюс); канал нейтронов со спином «вниз» знаком «-» (минус). Кроме того, имеется перемешивание каналов – нейтроны могут изменить направление спина в момент рассеяния на образце.

В результате мы получим четыре, различных в общем случае, коэффициента отражения: два основных, без изменения состояния («++» и «--»), и два с изменением состояния («+-» и «-+»). Из-за наличия взаимодействия каналов невозможно получить независимые уравнения для каждого коэффициента отражения. Фазовое уравнение принимает матричный вид, хотя схема его вывода остается аналогичной описанной в [3.1.9.12, 3.1.9.18, 3.1.9.19]:

$$\frac{d}{dx} B = (E^+ + BE^-)V(E^+ + BE^-). \quad (3.1.9.10)$$

Здесь B – матрица коэффициентов отражения:

$$B \equiv \begin{pmatrix} B_{++}(x, k) & B_{\pm}(x, k) \\ B_{\mp}(x, k) & B_{--}(x, k) \end{pmatrix}, \quad (3.1.9.11)$$

каждый элемент которой является коэффициентом отражения в определенном канале рассеяния и представляет собой функцию глубины x и волнового числа k .

Матрица V описывает потенциал взаимодействия в каждом канале:

$$V \equiv \begin{pmatrix} V_{++}(x) & V_{\pm}(x) \\ V_{\mp}(x) & V_{--}(x) \end{pmatrix}. \quad (3.1.9.12)$$

Чаще всего потенциал взаимодействия является функцией только глубины. Но для некоторых веществ, ядра которых резонансно взаимодействуют с тепловыми нейтронами, может возникнуть зависимость потенциала от длины волны и, следовательно, от волнового числа. Примером такого вещества является гадолиний.

Матрицы E^+ и E^- связаны с падающей и отраженной волнами соответственно:

$$E^+ \equiv \begin{pmatrix} \frac{e^{ikx}}{\sqrt{-2ik}} & 0 \\ 0 & \frac{e^{ikx}}{\sqrt{-2ik}} \end{pmatrix}, \quad E^- \equiv \begin{pmatrix} \frac{e^{-ikx}}{\sqrt{-2ik}} & 0 \\ 0 & \frac{e^{-ikx}}{\sqrt{-2ik}} \end{pmatrix}. \quad (3.1.9.13)$$

Все произведения в уравнении (3.1.9.10) являются матричными и в общем случае некоммутативны.

По аналогии с (1.5) введем обозначения для описания ядерного рассеяния:

$$\begin{aligned} \delta_n(x) &= \text{Re}[N(x)b_n(x)] \\ \beta_n(x) &= \text{Im}[N(x)b_n(x)], \end{aligned} \quad (3.1.9.14)$$

где $b_n(x)$ – длина ядерного рассеяния нейтронов на глубине x , $N(x)$ – число частиц в единице объема на глубине x . Величина $\delta_n(x)$ описывает преломление и отражение нейтронов в веществе, $\beta_n(x)$ – поглощение.

Для магнитного рассеяния:

$$\begin{aligned}\delta_m(x) &= \mu(x)N(x)b_m(x) \\ \beta_m(x) &= 0,\end{aligned}\quad (3.1.9.15)$$

где $b_m(x)$ – длина магнитного рассеяния нейтронов, $\mu(x)$ – магнитный момент частиц на глубине x в магнетонах Бора. Мнимая часть длины рассеяния отсутствует, поскольку взаимодействие с магнитной подсистемой не приводит к поглощению нейтронов. Если в системе имеется некий эффективный канал убывания нейтронов вследствие магнитного рассеяния, то $\beta_m(x) \neq 0$. Это редкие случаи, поэтому в дальнейших выкладках этот вариант не рассматривается. Но, при необходимости, $\beta_m(x)$ может быть учтена в потенциале взаимодействия.

Тогда элементы матрицы потенциала V могут быть представлены следующим образом [3.1.9.13]:

$$\begin{aligned}V_{++}(x) &= 4\pi[\delta_n(x) + \delta_m(x) \cos \alpha + i\beta_n(x)], \\ V_{--}(x) &= 4\pi[\delta_n(x) - \delta_m(x) \cos \alpha + i\beta_n(x)], \\ V_{+-}(x) &= V_{-+}(x) = 4\pi\delta_m(x) \sin \alpha.\end{aligned}\quad (3.1.9.16)$$

Здесь введена величина α – угол между направлением магнитного момента падающих нейтронов и направлением магнитного момента частиц образца. Если в образце не ферромагнитное упорядочение, то α различен в разных слоях. В геликоидальных системах с плавным поворотом магнитного момента угол является функцией глубины $\alpha(x)$.

В случае несимметричного взаимодействия каналов рассеяния $V_{+-}(x) \neq V_{-+}(x)$, но в рефлектометрии поляризованных нейтронов такие задачи не рассматриваются.

Матричное уравнение (3.1.9.10) может быть представлено и в виде системы из четырех связанных дифференциальных уравнений для каждого коэффициента отражения. Такая система является весьма громоздкой для записи и неудобной для численного решения, хотя может быть полезна для теоретического анализа частных случаев при определенных значениях и соотношениях между элементами потенциала. Например, используя систему, легко показать, что, если $V_{+-}(x) = V_{-+}(x)$, то и $B_{+-}(x) = B_{-+}(x)$. Но для расчетных задач предпочтительнее более компактная матричная форма.

Коэффициент поглощения нейтронов может быть рассчитан исходя из закона сохранения числа частиц. Нейтроны первичного пучка могут быть отражены от пленки, пройти сквозь нее или быть поглощенными в объеме пленки. Рассматривая общий случай поляризованных нейтронов и нормируя интенсивность первичного пучка на единицу, получим расчетные формулы для каналов:

$$\begin{aligned}a_+(k) &= 1 - R_{++}(k) - R_{\pm}(k) - T_{++}(k) - T_{\pm}(k), \\ a_-(k) &= 1 - R_{--}(k) - R_{\mp}(k) - T_{--}(k) - T_{\mp}(k).\end{aligned}\quad (3.1.9.17)$$

В случае неполяризованных нейтронов формула несколько упрощается:

$$a(k) = 1 - R(k) - T(k).\quad (3.1.9.18)$$

Модельные численные эксперименты

Рассмотрим образец типа резонатора: $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/^{10}\text{B}_4\text{C}(25 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$. Тантал выполняет роль сильноотражающих обкладок, которые формируют потенциальную яму. Ванадий имеет очень малую по модулю отрицательную плотность длины рассеяния нейтронов и хорошо подходит для заполнения внутреннего пространства ямы. Карбид бора, обогащенный изотопом ^{10}B , является сильнопоглощающим слоем внутри потенциальной ямы, его мнимая часть плотности длины рассеяния $\beta = 10^{-6} \text{ \AA}^{-2}$, тогда, как для большинства веществ она на 2-3 порядка меньше. В резонаторе, в потенциальной яме, возникает стоячая нейтронная волна, что приводит к уменьшению интенсивности отражения (грубо это можно объяснить тем, что часть нейтронов захватывается потенциальной ямой и поглощается в расположенном там слое $^{10}\text{B}_4\text{C}$). Подробно процессы возникновения стоячих нейтронных волн и явления, порождаемые ими рассмотрены в работе [3.1.9.20] На рис. 3.1.9.1 приведена область полного внешнего отражения для указанного выше образца. Хорошо виден резонансный минимум.

Значение $q = 0.016 \text{ \AA}^{-1}$ является критическим значением изменения волнового вектора, после которого наблюдается значительное проникновение нейтронов в образец и спад интенсивности отражения.

Сильнопоглощающий слой (в рассматриваемом примере $^{10}\text{B}_4\text{C}$) делает резонансный провал более выраженным. Если известна ширина потенциальной ямы (слоя V), то из анализа формы провала можно определить плотность длины рассеяния $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Это делается путем уточнения параметров по алгоритму Левенберга-Марквардта.

Если использовать в качестве поглощающего слоя гадолиний, ядра изотопов которого резонансно взаимодействуют с тепловыми нейтронами, то можно еще больше увеличить глубину провала. Кроме того, его положение и форма зависят от угла падения, что показано на рис. 3.1.9.2. Тем не менее, поглощающий слой изменяет свойства резонатора, поэтому в общем случае возможно и уменьшение интенсивности сигнала.

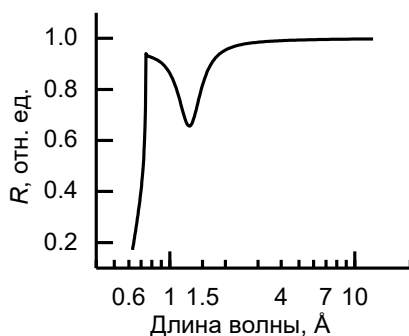


Рисунок 3.1.9.1. Резонансный минимум на полном внешнем отражении в системе $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/^{10}\text{B}_4\text{C}(25 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$.

Приведенный расчет (и все последующие) соответствует времяпролетному рефлектометру, для угла падения 1 мрад. Определить непосредственно плотность длины рассеяния Gd в этом случае нельзя, поскольку она зависит от энергии нейтронов [3.1.9.21]. Но, также используя алгоритм Левенберга-Марквардта, можно определить энергетические характеристики резонансов Gd, а затем рассчитать плотность длины рассеяния, как функцию энергии нейтронов, используя формулу Брейта-Вигнера. В больших длинах волн мнимая часть плотности длины рассеяния Gd почти постоянна, $\beta \approx 3 \cdot 10^{-6} \text{ \AA}^{-2}$, что даже больше, чем у $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

Возникающую в резонаторе стоячую волну можно визуализировать, если, используя приведенные выше алгоритмы, рассчитать волновую функцию нейтронов и построить квадрат модуля этой функции (рис. 3.1.9.3). На рисунке также приведена проекция поверхности в виде карты в оттенках серого.

Математический смысл поверхности, изображенной на рис. 3 – плотность вероятности обнаружить нейтрон с определенной энергией на некоторой глубине в образце. Перепад высот примерно по средней линии – поглощающий слой Gd, который уменьшает количество нейтронов за ним. «Долина»-минимум является узлом стоячей волны. Энергия, при которой узел «входит» в область потенциальной ямы, соответствует минимуму отражения. На рис. 3.1.9.4 показано поведение коэффициентов прохождения и поглощения образца вблизи минимума.

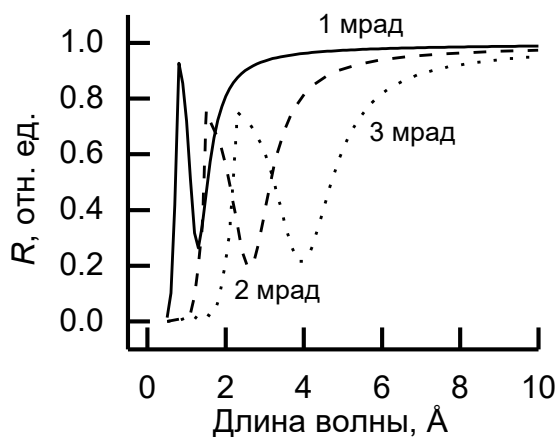


Рисунок 3.1.9.2. Резонансные минимумы на полном внешнем отражении в системе $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Gd}(25 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$ при углах падения 1 мрад (линия), 2 мрад (штрих) и 3 мрад (пунктир).

Видно, что коэффициент прохождения очень мал, и поведение коэффициента отражения полностью определяется коэффициентом поглощения. Следовательно, измерив рефлектометрическую кривую в данной области, что является более простым экспериментом, мы получим полную информацию о поглощении.

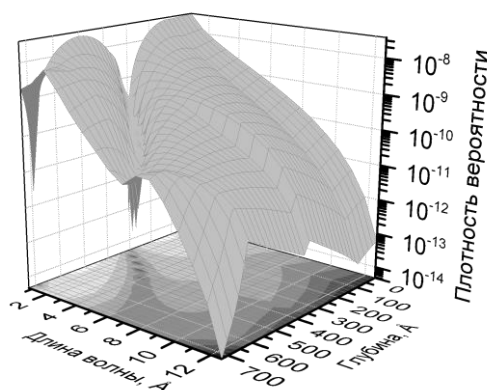


Рисунок 3.1.9.3. Плотность вероятности обнаружить нейтрон в системе $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Gd}(25 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$. На проекции более темные цвета соответствуют меньшим значениям.

Если сделать потенциальную яму достаточно широкой, в ней может оказаться несколько узлов стоячей волны. Тогда в области полного внешнего отражения окажется столько же минимумов. На рис. 3.1.9.5 показано отражение для системы $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(1000 \text{ \AA})/\text{Gd}(25 \text{ \AA})/\text{V}(1000 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$, в которой возникает 4 минимума, их порядки указаны на рисунке цифрами.

Такая сложная картина полного внешнего отражения позволяет с большей точностью определить энергетические характеристики резонансов гадолиния или плотность длины рассеяния карбида бора.

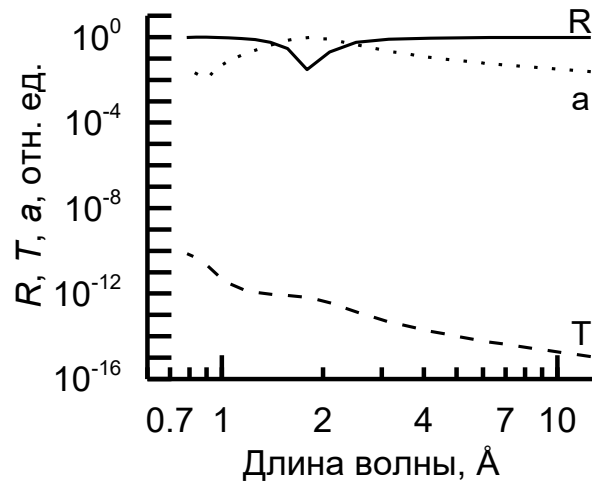


Рисунок 3.1.9.4. Коэффициенты отражения (линия), прохождения (штрих) и поглощения (пунктир) в области полного внешнего отражения.

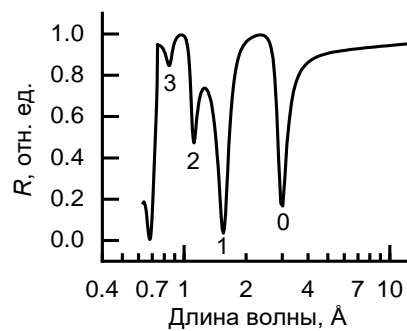


Рисунок 3.1.9.5. Коэффициент отражения для системы $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(1000 \text{ \AA})/\text{Gd}(25 \text{ \AA})/\text{V}(1000 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$ с большим количеством резонансных минимумов. Цифрами отмечены порядки резонансов.

Оптимальные параметры сильнопоглощающих слоев для использования систем на их основе в конвертерах нейтронов

Рассмотрим процессы поглощения нейтронов и генерация вторичного излучения в системах с толстым слоем сильнопоглощающего нейтроны вещества на стеклянной подложке. Цель – определить оптимальные конфигурации для получения высокого коэффициента поглощения образца ($\mu \geq 0.9$) в достаточно широком диапазоне длин волн. Рассматриваемые образцы:

1. $\text{SiO}_2//^{10}\text{B}_4\text{C}(t)$ – слой карбида бора, обогащенного изотопом ^{10}B , толщины $t=1, 3$ мкм.
2. $\text{SiO}_2//\text{V}(50 \text{ \AA})/\text{Gd}(t)/\text{V}(50 \text{ \AA})$ – слой гадолиния, толщины $t=1, 3$ мкм. Слои ванадия необходимы для защиты гадолиния от окисления при взаимодействии с подложкой и атмосферным воздухом.

На рис. 3.1.9.6 представлены зависимости коэффициенты поглощения для образца $^{10}\text{B}_4\text{C}$ для двух указанных толщин в зависимости от длины волны λ , при нормальном падении нейтронного пучка.

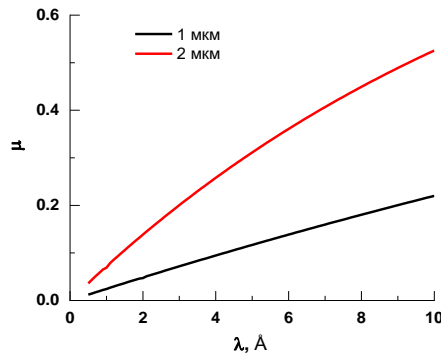


Рисунок 3.1.9.6. Коэффициенты поглощения слоев $^{10}\text{B}_4\text{C}$ различной толщины.

Видно, что даже толщина в 3 мкм не обеспечивает желаемого значения коэффициента поглощения. Дальнейшее увеличение толщины покрытия является технологически сложным, но путь нейтронов в образце можно увеличить, повернув его на некоторый угол относительно падающего пучка. На рис. 3.1.9.7 представлено поведение коэффициента поглощения при повороте образца $\text{SiO}_2//^{10}\text{B}_4\text{C}$ (3 мкм) на различные углы. Только при угле падения 10° величина $\mu > 0.9$ достигается при $\lambda > 5.5 \text{ \AA}$. Коэффициент отражения при таком угле падения не превышает 10^{-6} и не оказывает существенного влияния на прохождение нейтронов вглубь образца. При таких условиях интенсивность вторичного излучения совпадает с ходом коэффициента поглощения.

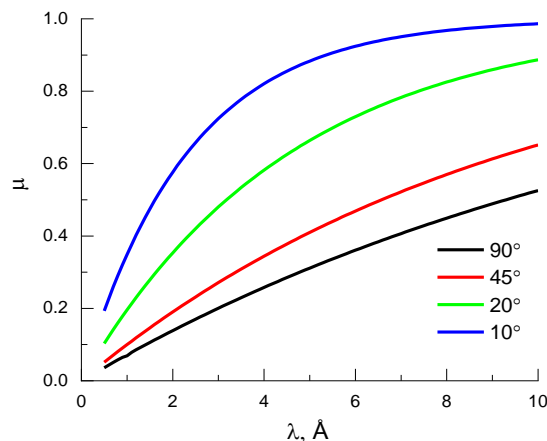


Рисунок 3.1.9.7. Коэффициенты поглощения образца $\text{SiO}_2//^{10}\text{B}_4\text{C}$ (3 мкм) при различных углах падения нейтронного пучка.

На рис. 3.1.9.8 представлены зависимости коэффициента отражения от длины волны для образцов, содержащих слой Gd различной толщины, при нормальном падении нейтронного пучка. В состав природного гадолиния входят два изотопа, ^{155}Gd и ^{157}Gd , ядра которых взаимодействуют с тепловыми нейтронами резонансным образом. Это приводит к сильному поглощению нейтронов в Gd, сопровождающемуся генерацией вторичного гамма-излучения, и качественно иному поведению коэффициента поглощения в зависимости от длины волны. Особенностью коэффициента поглощения слоев Gd является очень быстрый рост в малых длинах волн. Но, в отличие от карбида бора, при длинах волн, меньших 1 \AA , коэффициент поглощения очень мал и практически не меняется с изменением толщины. Но на практике редко встречаются задачи, требующие работы с нейтронами таких длин волн.

Несмотря на быстрый рост с поглощения длиной волны, слой Gd толщиной 3 мкм также не может обеспечить желаемую величину коэффициента поглощения при нормальном падении. Поэтому был проведен расчет (рис. 3.1.9.9) для различных углов падения нейтронов на образец $\text{SiO}_2/\text{V}(50 \text{ \AA})/\text{Gd}(3 \text{ мкм})/\text{V}(50 \text{ \AA})$. Наиболее оптимальным выглядит угол падения 10° , при котором

наблюдается практически скачкообразный рост коэффициента поглощения в малых длинах волн и достижение значения $\mu \approx 0.9$ при $\lambda \approx 1.7 \text{ \AA}$. При больших длинах волн коэффициент поглощения меняется очень слабо.

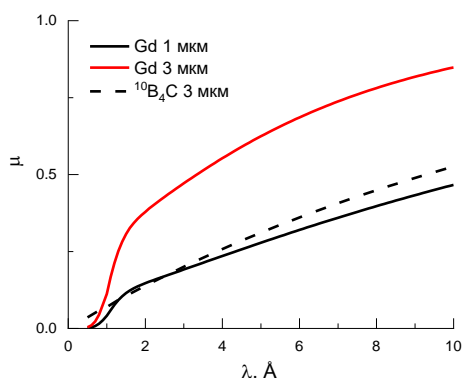


Рисунок 3.1.9.8. Коэффициенты поглощения слоев Gd различной толщины. Пунктиром, для сравнения, приведен коэффициент поглощения слоя $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной 3 мкм.

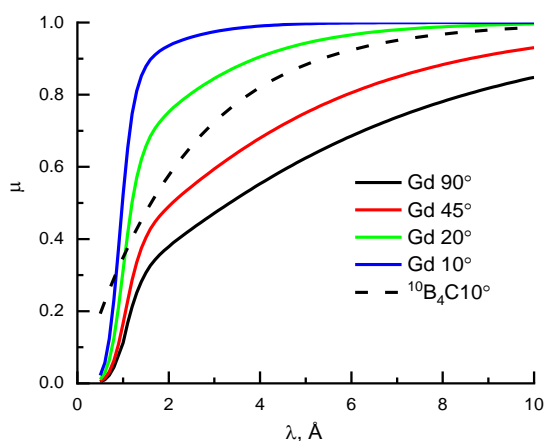


Рисунок 3.1.9.9. Коэффициенты поглощения образца $\text{SiO}_2/\text{V}(50 \text{ \AA})/\text{Gd}(3 \text{ мкм})/\text{V}(50 \text{ \AA})$ при различных углах падения нейтронного пучка. Пунктиром, для сравнения, приведен коэффициент поглощения $\text{SiO}_2/^{10}\text{B}_4\text{C}(3 \text{ мкм})$ при угле падения 10° .

Для очень малых длин волн $\lambda \sim 0.5 \text{ \AA}$ поглощение практически отсутствует. При необходимости работать в этой области, можно рассмотреть использование комбинированной системы, например $\text{SiO}_2/\text{V}(50 \text{ \AA})/\text{Gd}(1.5 \text{ мкм})/^{10}\text{B}_4\text{C}(1.5 \text{ мкм})$. Ее сравнение с «чистыми» системами приведено на рис. 3.1.9.10. Коротковолновый «хвост» немного приподнимается, обеспечивая ненулевое поглощение при $\lambda < 0.8 \text{ \AA}$. При этом коэффициент поглощения незначительно падает в области $1 \text{ \AA} < \lambda < 6 \text{ \AA}$. Сравнение проводилось с системами $\text{SiO}_2/\text{V}(50 \text{ \AA})/\text{Gd}(3 \text{ мкм})/\text{V}(50 \text{ \AA})$ и $\text{SiO}_2/^{10}\text{B}_4\text{C}(3 \text{ мкм})$, угол падения во всех случаях составляет 10° .

Показано, что при использовании слоев сильнопоглощающих веществ в качестве конвертора нейтронов (за счет эффекта вторичного излучения) необходимо обеспечивать угол падения первичного пучка примерно 10° . Тогда, за счет увеличения длины пути нейтрона в образце, существенно возрастает коэффициент поглощения, особенно при больших длинах волн. Следовательно, возрастает и процент конвертации. Использование гадолиния может быть более выгодно за счет большего коэффициента поглощения и более быстрого его возрастания в малых длинах волн. Но преимуществом карбида бора, несмотря на более слабое поглощение, является

вторичное излучение в виде альфа-частиц, которое гораздо проще детектируется по сравнению с гамма-излучением гадолиния.

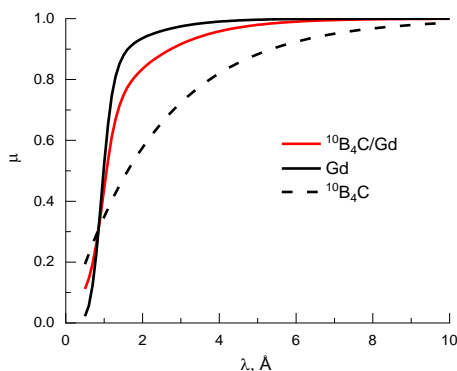


Рисунок 3.1.9.10. Коэффициент поглощения комбинированной системы $\text{SiO}_2/\text{V}(50 \text{ \AA})/\text{Gd}(1.5 \text{ мкм})/^{10}\text{B}_4\text{C}(1.5 \text{ мкм})$.

Применение рефлектометрии поляризованных нейтронов к исследованию многослойных наноструктур, содержащих сильнопоглощающие нейтроны изотопы гадолиния

Рефлектометрия поляризованных нейтронов (РПН) эффективно применяется для исследования многослойных наноструктур, чтобы получить информацию о распределении по глубине ядерной и магнитной плотности. В применении РПН к исследованию редкоземельных наноструктур, содержащих гадолиний, серьезную проблему представляет поглощение нейтронов, причем наибольшие трудности возникают при исследовании систем, содержащих Gd, который отличается рекордными значениями сечения поглощения тепловых нейтронов. Важной задачей является определение параметров образцов, которые могут быть исследованы методом РПН. С этой целью были изучены 3 многослойных наноструктуры мы рассматриваем случай сверхрешеток $[\text{Dy}(t_1)/\text{Gd}(t_2)]_{20}$ с разными соотношениями толщин слоев t_1 и t_2 (1:1, 2:1, 3:1) с целью выяснить, при каких условиях РПН может быть чувствительна к изменению внутрислойного магнитного упорядочения в сверхрешетках. Идея эксперимента в том, при различных соотношениях толщин t_1 и t_2 становятся запрещенными структурные рефлексы различного порядка от ядерной сверхрешеточной структуры (рефлексы второго порядка при соотношении толщин Dy и Gd 1:1, рефлексы третьего порядка при соотношении толщин 1:2 и т.д.). Однако, в случае, когда магнитная периодичность в сверхрешетке становится несоизмеримой со сверхрешеточной ядерной периодичностью, то можно ожидать детектирования запрещенных сверхрешеточных рефлексов магнитного происхождения. Хорошо известно, что в слоях Dy при температуре $T = 10 \text{ К}$ формируется ферромагнитное упорядочение, а при $T = 100 \text{ К}$ - геликоидальное магнитное упорядочение с периодом, несоизмеримым с толщиной слоев Dy. В первом случае магнитная периодичность в сверхрешетке будет совпадать с ядерной, во втором – магнитный период не совпадает с ядерным. Если удастся наблюдать запрещенные рефлексы во втором случае, то с помощью РПН можно получать информацию о магнитной структуре сверхрешеток, если нет – то РПН не чувствительна к магнитному упорядочению в слоях Dy. Измерения были выполнены с полным поляризационным анализом в магнитном поле 100 Э при температурах 10 К и 100 К, соответствующих ферромагнитному и геликоидальному магнитному упорядочению в объемном Dy. Магнитное состояние в сверхрешетках было приготовлено охлаждением в магнитном поле величиной 4.5 кЭ от комнатной до заданной температуры, после чего магнитное поле было уменьшено до 100 Э.

На Рис. 3.1.9.11 – 3.1.9.13 приведены кривые ПНР, измеренные при температурах $T = 10 \text{ К}$ и 100 К от образцов $\text{Dy}(9\text{нм})/\text{Gd}(3\text{нм})$, $\text{Dy}(6\text{нм})/\text{Gd}(3\text{нм})$, $\text{Dy}(6\text{нм})/\text{Gd}(6\text{нм})$.

На нейтронных рефлектограммах для образцов $\text{Dy}(9\text{нм})/\text{Gd}(3\text{нм})$, $\text{Dy}(6\text{нм})/\text{Gd}(3\text{нм})$ видны сверхрешеточные рефлексы первого порядка. Мы не приводим кривые для спин-флип рассеяния,

т.к. рассеяния нейтронов с переворотом спина в экспериментах не было детектировано. Очевидно, что появление указанных пиков обусловлено наличием структурной периодичности ядерной длины рассеяния в сверхрешетке. Магнитная периодичность в этих сверхрешетках либо совпадает со структурной, либо слабо проявляется на нейтронограммах. Кроме того, в сверхрешетках наблюдается небольшая ферромагнитная компонента, причем нейтронные кривые, измеренные выше и ниже температуры Кюри Dy отличаются незначительно. Таким образом, в данном случае нейтронная рефлектометрия оказывается малочувствительной к изменению магнитного упорядочения в слоях Dy.

Иная ситуация наблюдается для образца Dy(60Å)/Gd(60Å). Поскольку соотношение толщин слоев Dy и Gd 1:1, то структурные сверхрешеточные рефлексы четных порядков запрещены. Действительно, на рефлектограмме присутствует сверхрешеточный пик первого порядка. На нейтронограммах, измеренных ниже температуры Кюри Dy при $T=10$ К, сверхрешеточный пик второго порядка также отсутствует. Однако, сверхрешеточные рефлексы второго порядка наблюдаются на нейтронограммах при $T = 100$ К (выше температуры Кюри но ниже температуры Нейля Dy). Вне всяких сомнений, природа данного пика чисто магнитного происхождения, т.к. его наличие и интенсивность зависит от температуры. Причина появления запрещенного магнитного сверхрешеточного пика – наличие в образце магнитной периодичности, отличающейся от структурной. Как известно, период геликоидального магнитного упорядочения несоизмерим с параметрами кристаллической решетки Dy и со сверхрешеточной структурной периодичностью. Характерно, что остальная часть нейтронных рефлектометрических кривых, измеренных при $T= 10$ К и 100 К, крайне незначительно отличается. Фактически, геликоидальное магнитное упорядочение в Dy проявляется только в возникновении запрещенного магнитного рефлекса «поверх» рефлектометрической кривой. Таким образом, для того, чтобы детектировать в редкоземельных сверхрешетках наличие несоизмеримого геликоидального магнитного упорядочения, необходимо оптимизировать слоистую структуру сверхрешеток, подбирая такое соотношение толщин, при котором становятся запрещенными некоторые сверхрешеточные рефлексы. Разумеется, такое искусственное формирование слоистой структуры исследуемых сверхрешеток ограничивает постановку физической задачи, но другой возможности детекторирования геликоидального упорядочения в сверхрешетках методом рефлектометрии поляризованных нейтронов нет.

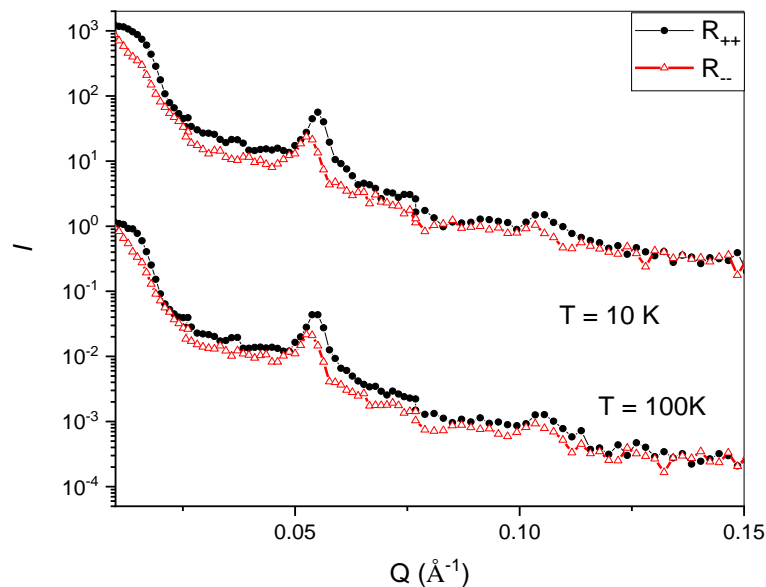


Рисунок 3.1.9.11. Кривые РПН от образца Dy(9нм)/Gd(3нм).

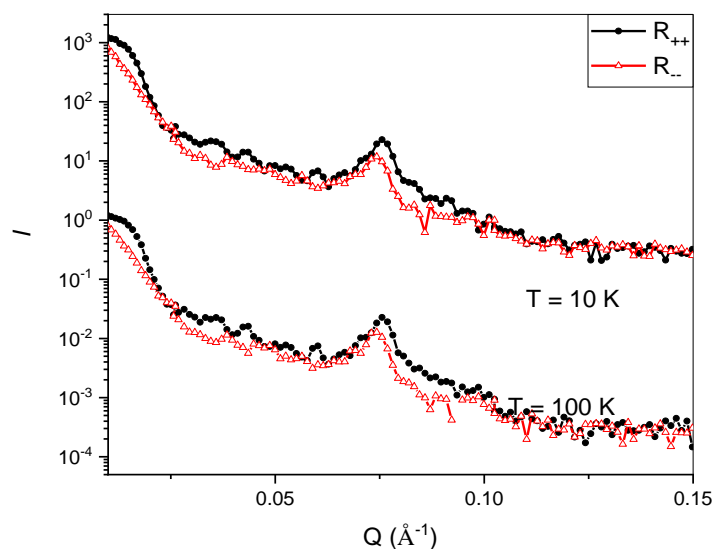


Рисунок 3.1.9.12. Кривые РПН от образца Dy(6нм)/Gd(3нм).

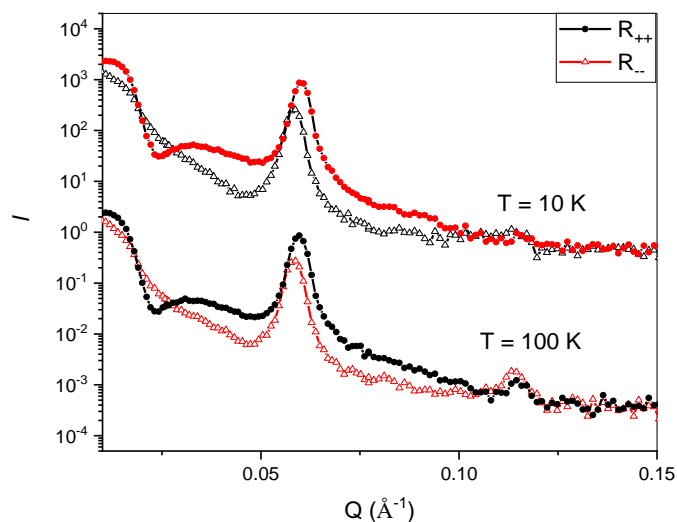


Рисунок 3.1.9.13. Кривые РПН от образца Dy(6нм)/Gd(6нм).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [3.1.9.1] Pleshanov N. K., Peskov B. G., Pusenkov V. M. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2006. V. 560. 464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.12.243>
- [3.1.9.2] Frank A. I., Bodnarchuk V. I., Geltenbort P. et al. // Phys. At. Nucl. 2003. V. 66, № 10, P. 1831. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1619495>
- [3.1.9.3] Франк И. М. // Усп. физ. наук. Т. 161. № 11. С. 109.
- [3.1.9.4] Gurevich A. I. and Lomonosov V. V. // Phys. At. Nucl. 1997. V. 60. P. 510
- [3.1.9.5] Majkrzak C. F., Berk N. F. // Phys. Rev. B. 1995. V. 52. № 15. P. 10827. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.10827>
- [3.1.9.6] De Haan V. O., Van Well A. A., Sacks P. E. et al. // Physica B. 1996. V. 221. P. 524. DOI: [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(95\)00975-2](https://doi.org/10.1016/0921-4526(95)00975-2)
- [3.1.9.7] Nikova E. S., Salamatov Yu. A., Kravtsov E. A. et al. // Superlattices Microstruct. V. 109. P. 201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.05.013>

- [3.1.9.8] Никова Е. С., Саламатов Ю. А., Кравцов Е. А. и др. // ФММ. 2019. Т. 120, С. 913. DOI: 10.1134/S0015323019090109
- [3.1.9.9] Piscitelli F., Khaplanov A., Devishvili A. et al. // Proc. Math. Phys. Eng. Sci. 2016. V. 472. P. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.2015.0711>
- [3.1.9.10] Франк А. И., Боднарчук В. И., Кулин Г. В. и др. О длине когерентного рассеяния естественного гадолиния. Дубна: Препринты Объединенного института ядерных исследований. 2002. P3-2002-288. 12 с.
- [3.1.9.11] В.Д. Жакетов, К. Храмко, А.В. Петренко и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. № 6. С. 10. DOI: <https://doi.org/10.31857/S1028096021060170>
- [3.1.9.12] Бабилов В.В. Метод фазовых функций в квантовой механике. М.: Наука, 1976. 288 с.
- [3.1.9.13] Lekner J. Theory of reflection of electromagnetic and particle waves. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 281 p.
- [3.1.9.14] Neutron activation and scattering calculator: <https://www.ncnr.nist.gov/resources/activation/>
- [3.1.9.15] Parratt L.G. // Phys Rev. 1954. V. 95. № 2. P. 359. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.95.359>
- [3.1.9.16] Abeles F. // Annales de Physique. 1950. Т. 12. № 5. P. 596. DOI: <https://doi.org/10.1051/anphys/195012050596>
- [3.1.9.17] Игнатович В.К. Нейтронная оптика. М.: Физматлит, 2006. 336 с.
- [3.1.9.18] Calogero F. Variable Phase Approach to Potential Scattering. N-Y: Academic Press Inc., 1967. 243 p.
- [3.1.9.19] Саламатов Ю.А., Кравцов Е.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2021. № 5. С. 3. DOI: 10.31857/S1028096021050174
- [3.1.9.20] Ю. В. Никитенко // ЭЧАЯ. 2009. Т. 40. №. 6. С. 1682.
- [3.1.9.21] Mughabghab S., Divadeenam M., and Holden N. E. Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. N-Y: Brookhaven National Laboratory, 1981. 826 p.

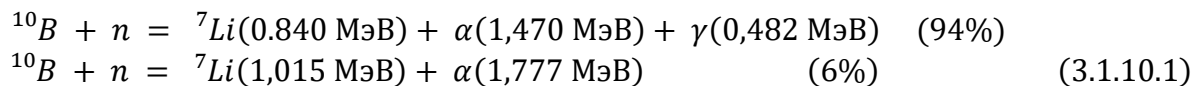
ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Отчет о выполнении. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.9 Отчет о выполнении.pdf](#)

3.1.10 Разработка ускорительной и реакторной технологии. Разработка технологии нанесения покрытий на основе карбида бора В₄С на полимерные пленки с высокой температурой плавления -полиимид (картон) и лавсан (maular) для дальнейшего использования в качестве конвертера нейтронного излучения в детекторах на ускорительных и реакторных источниках нейтронов.

Важной и актуальной научной задачей является создание высокоэффективных детекторов большой площади для регистрации медленных нейтронов, конвертеры которых содержат изотоп бора ¹⁰В. Такие детекторы смогут заменить существующие детекторы на основе ³Не во многих областях применения, причём для некоторых задач они могут иметь даже лучшие характеристики.

Сечение взаимодействия изотопа бора ¹⁰В с тепловыми нейтронами 0,025МэВ составляет 3800 барн. Медленные нейтроны взаимодействуют с ядрами изотопа бора ¹⁰В с выделением 2,78МэВ. Энергия распределяется между ядром изотопа лития ⁷Li, α-частицей и γ-квантом по двум каналам:



Природный (естественный) бор состоит из двух изотопов ¹⁰В (18%) и ¹¹В (82%). Промышленность в настоящее время производит для нужд атомных электростанций аморфный бор, обогащённый по изотопу ¹⁰В не менее 95%. Бор образует большое количество твёрдых соединений. Среди них наибольший интерес представляет карбид бора В₄С, обладающий высокой износостойкостью, высокой температурой плавления и высокой химической стойкостью. В настоящее время доступно приобретение карбида бора, в состав которого входит более 95% изотопа ¹⁰В.

Длина пробега тепловых нейтронов в карбиде бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ до ослабления потока в $e \approx 2,7$ раз составляет около 30 мкм. Длина пробега частиц распада в материале карбида бора, учитывая кинетические энергии частиц составляет 3,5 мкм для α -частицы и 1,7 мкм для ^7Li . С одной стороны, для уменьшения потерь энергии частиц при выходе из слоя карбида бора, толщина покрытия должна быть наименьшей. С другой стороны, для обеспечения большего числа захвата нейтронов, толщина покрытия должна быть наибольшей.

Оптимальная толщина однослойного покрытия для регистрации нейтронов с длиной волны 1,8Å по расчётам, выполненным используя методику Монте-Карло, составляет около 2,5 мкм. При этом эффективность регистрации составляет не более 6% [3.1.10.1]. Для повышения эффективности собирают многослойные детекторы. Лучшим решением для построения многослойного детектора, состоящего из более 30 слоёв, является конструкция, содержащая 0,5 мкм в первых 10 слоях, далее 0,85 мкм, и 1,5 мкм в последних 7 слоях. При этом эффективность регистрации нейтронов с длиной волны 1,8Å может достигать около 60%.

Значительных успехов в разработке детекторов тепловых нейтронов с конвертером на основе карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ удалось добиться учёным из детекторной группы строящегося в г. Лунд (Швеция) Европейского центра ESS (The European Spallation Source) [3.1.10.2]. Совместно с сотрудниками Линчёпингского университета разработана технология нанесения тонкоплёночных покрытий карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на алюминиевые основания и алюминиевые листы большой площади толщиной не менее 0,5 мм. На базе этих конвертеров изготавливаются многослойные детекторы нейтронов для ESS «multi-blade» и «multi-grid», конструкция которых представляет собой многокамерный газовый детектор, содержащий параллельно установленные листы алюминия толщиной от 0,5 мм до 2 мм с тонкоплёночным покрытием $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной от 0,5 мкм до 7 мкм. Технология основана на магнетронном распылении мишени из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ и осаждении распылённого материала мишени на алюминиевые подложки, нагретые до 500°C.

Недостатком технологии является то, что эта технология не позволяет выполнять нанесение карбида бора на алюминиевую фольгу, так как температура плавления алюминия составляет 660°C, а от магнетрона идёт тепловое излучение, которое приводит к локальному перегреву тонкой подложки, что приводит к её деформированию. Кроме того, эта технология не позволяет наносить покрытия из карбида бора B_4C на полимерные покрытия, что является актуальным для создания новых детекторов нейтронов.

В ЛНФ ОИЯИ разработана технология низкотемпературного магнетронного нанесения тонкоплёночных покрытий из карбида бора B_4C , обогащённого изотопом ^{10}B , на любые алюминиевые основания большой площади, в том числе и на фольгу, которое осуществляется при температурах оснований от 50°C до 200°C. Технология разработана в соответствии с пунктом 2.1.4 Плана-графика Договора между ОИЯИ и Министерством науки и высшего образования на выполнение ОИЯИ исследовательской программы (проекта) в рамках Соглашения № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021г. (внутренний номер 15.СИН.21.0021). Отчёт по технологии нанесения покрытий на основе карбида бора B_4C на алюминиевые основания для дальнейшего использования в качестве конвертера нейтронного излучения в детекторах на ускорительных и реакторных источниках нейтронов представлен в отчёте за 2 этап выполнения Соглашения № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021г.

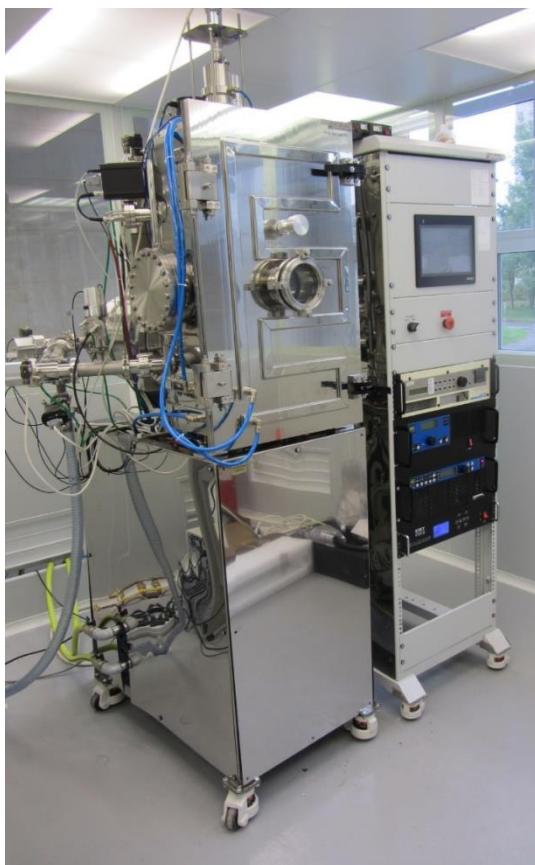


Рисунок 3.1.10.1. Фотография установки.

Новая технология нацелена на нанесение тонкоплёночных покрытий из карбида бора B_4C , обогащённого изотопом ^{10}B , на радиационно-стойкие полимерные плёнки большой площади. К таким плёнкам относятся полиимидные (Kapton) и полиэтилентерефтолатные (ПЭТФ, Лавсан, Mylar) плёнки. Новая технология учитывает особенности, связанные с ограничением нагрева подложек из полимерных плёнок. Для лавсановой плёнки важным условием является нагрев до температуры кристаллизации, которая составляет около $150^{\circ}C$. При нагреве до такой температуры начинается кристаллизация изначально аморфной прозрачной лавсановой плёнки, приводящая к появлению матовости в местах кристаллизации и деформации, приводящей к усадке. При магнетронном распылении присутствует радиационный нагрев подложки от плазменного разряда магнетрона, который необходимо ограничивать, чтобы не повысить температуру в вакуумной камере и на поверхности лавсановой подложки до $110^{\circ}C$. Оптимальная рабочая температура составляет $50^{\circ}C$.

Технология нанесения тонкоплёночных покрытий из карбида бора B_4C , обогащённого изотопом ^{10}B , на радиационно-стойкие полимерные плёнки большой площади должна обеспечивать:

1. нанесение покрытий на подложки из полимерных плёнок большой площади при температуре подложек от $50^{\circ}C$ до $110^{\circ}C$;
2. нанесение покрытий с высокой адгезией к подложкам из полимерных плёнок;
3. получение покрытий площадью не менее $200 \times 200 \text{ мм}^2$;
4. получение покрытий с высокой однородностью толщины по всей поверхности;
5. получение покрытий без примесей высокой чистоты.

Создание тонкоплёночных конвертеров на алюминиевых основаниях с требуемыми характеристиками является сложной технической и научной задачей.

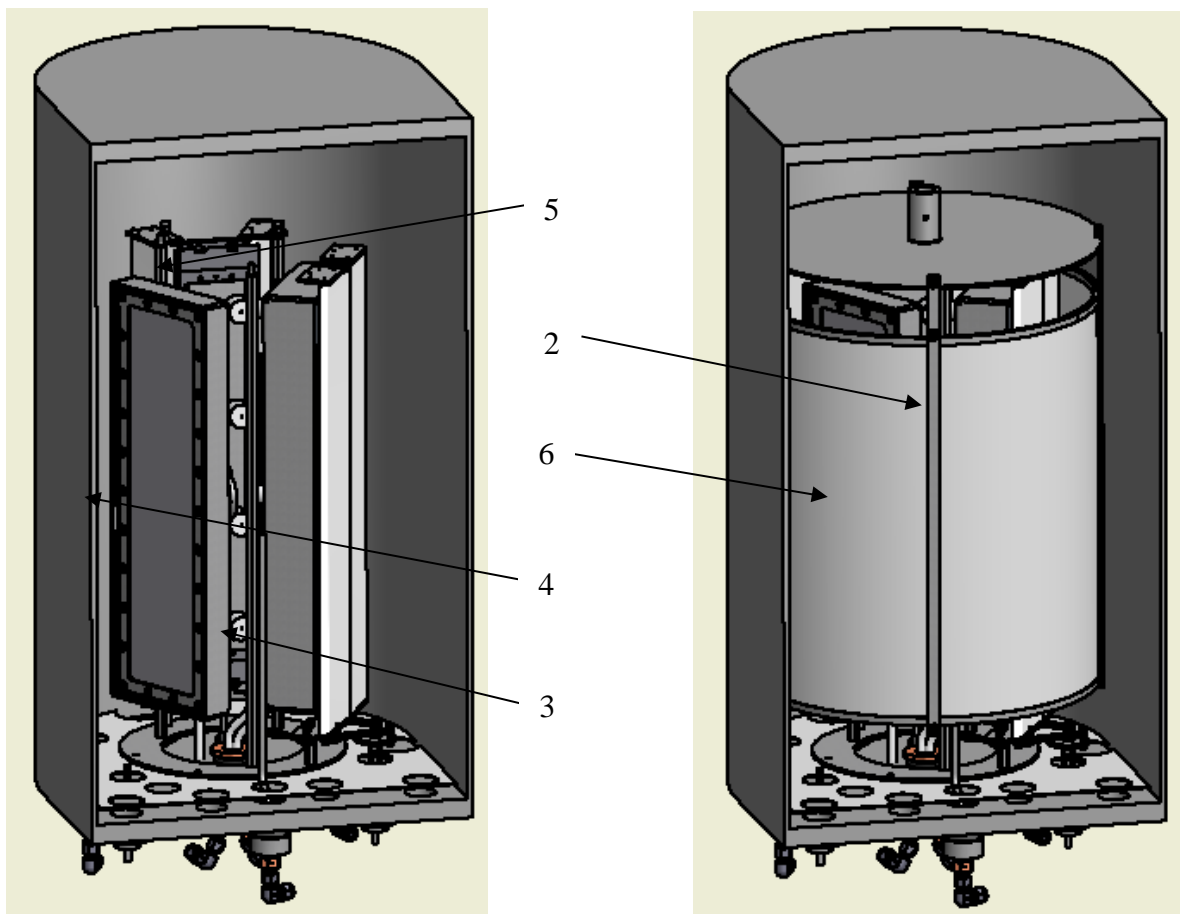


Рисунок 3.1.10.2. Схема вакуумной камеры установки.

(1) – ТЭН для нагрева камеры; (2) – крепление с подложками (6); (3) – магнетрон с мишенью $^{10}\text{B}_4\text{C}$; (4) – магнетрон с мишенью Al; (5) – ионный источник.

Техническое решение получения тонкоплёночных покрытий из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ при низких температурах заключается в формировании покрытий с применением магнетронного распыления мишени из карбида бора с применением ионного ассистирования. Работы по отработке технологии были выполнены на лабораторной вакуумной установке VSR-300 (сборка компании РОБВАК г. Фрязино), предназначенной для термического резистивного распыления. Технология нанесения тонкоплёночных покрытий из карбида бора B_4C , обогащённого изотопом ^{10}B , на полимерные радиационно-стойкие плёнки с высокой температурой плавления площадью не менее $200 \times 200 \text{ мм}^2$ является дальнейшим развитием технологии получения покрытий из карбида бора B_4C на алюминиевых подложках, описанной в работе [3.1.10.3]. Структура получаемых покрытий из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на полимерных подложках ничем не отличается от описанных в работе покрытий на алюминиевых подложках. Фотография установки представлена на рис. 3.1.10.1. На рис. 3.1.10.2 приведена схема вакуумной камеры установки. На рис. 3.1.10.3 приведена фотография подложки в виде рамки с закреплённой на ней металлизированной лавсановой плёнки.

Из-за особенности конструкции камеры VSR-300 U-образного типа размером $400(\text{Ш}) \times 700(\text{В}) \text{ мм}^2$ два сбалансированных магнетрона (3 и 4) и ионный источник (5) размещены в центре камеры. Один магнетрон оснащён мишенью $^{10}\text{B}_4\text{C}$, второй – мишенью Al, обе мишени размером $5 \times 100 \times 400 \text{ мм}^3$ имеют косвенное охлаждение водой. Ионный источник (5) замкнутого дрейфа, формирующий два параллельных ленточных луча шириной 2 мм и длиной 400 мм, используемый для очистки и ассистирования, размещён между магнетронами. Нанесение покрытия осуществляется на внутреннюю поверхность подложек (6), изогнутых с помощью крепления (2) до образования цилиндрического барабана, состоящего из четырёх подложек (6) размером $400 \times 280 \text{ мм}^2$. Для закрепления металлизированной алюминием лавсановой плёнки изготовлены жёсткие

подложки в виде рамки с отверстием 210×250 мм². Для решения технологической задачи было выполнено большое количество экспериментов с подбором режима работы магнетрона и ионного источника, температурного режима, подбора давления газовой среды и напряжения смещения, подаваемого на подложку. В результате отработана технология получения покрытия из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на полимерных плёнках.

На рис. 3.1.10.3 приведены фотографии закрепления металлизированной алюминием лавсановой плёнки на жёстких подложках в виде рамки с отверстием 210×250 мм². Покрытие из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ наносится на алюминиевый металлизированный слой. На рис. 3.1.10.3а металлизированный слой покрыт слоем карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

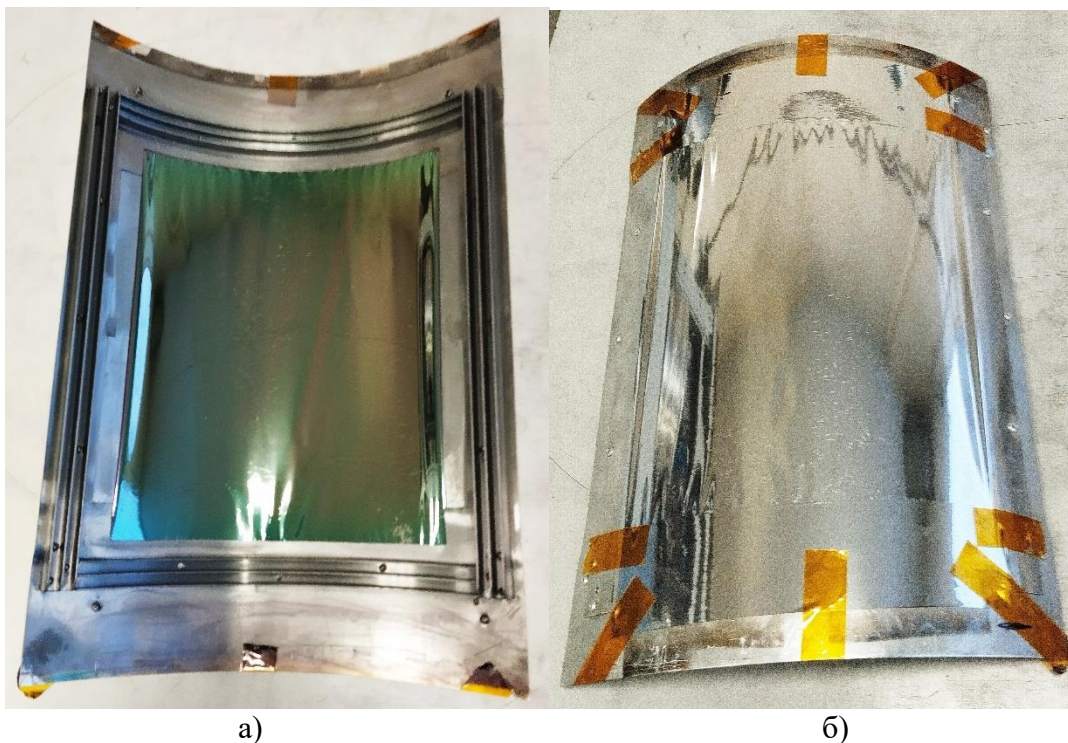


Рисунок 3.1.10.3. Фотографии закрепления металлизированной алюминием лавсановой плёнки.

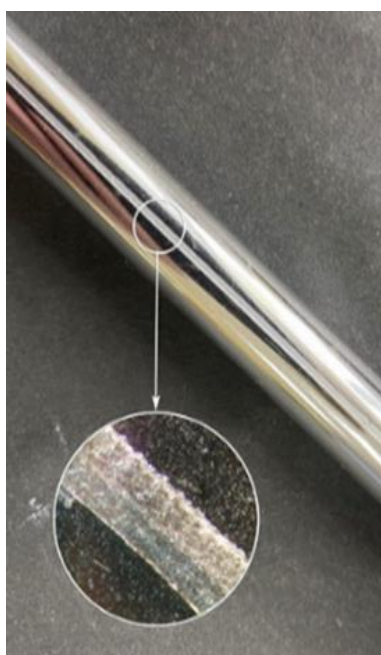
Экспериментальные результаты применения технологии

Для изготовления straw-трубок лавсановая плёнка толщиной 20 мкм с покрытием из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ нарезается на полосы шириной 31 мм и длиной 250 мм. С помощью вакуумного прижима плёнка обжимает калиброванный стержень, позволяя выполнить ультразвуковую сварку плёнки внахлест. На рис. 3.1.10.4 приведена фотография станка для ультразвуковой сварки лавсановых straw-трубок диаметром 10 мм. На рис. 3.1.10.5а приведена микрофотография сварного шва.

Из полученных лавсановых straw-трубок изготавливаются газовые детекторы, содержащие позолоченную вольфрамовую проволоку толщиной 20 мкм, размещаемую вдоль оси трубки, продуваемой смесью рабочих газов. На рис. 3.1.10.5б приведена фотография составляющих частей прототипа детектора на основе одной лавсановой straw-трубки. На рис. 3.1.10.6 представлена фотография прототипа детектора с размещением straw-трубки в ряд, создавая многослойную конструкцию для увеличения эффективности регистрации нейтронов



Рис. 3.1.10.4. Фотография станка для ультразвуковой сварки лавсановых straw-трубок диаметром 10 мм.



а)



б)

Рисунок 3.1.10.5. Фотография составляющих частей прототипа детектора на основе одной лавсановой straw-трубки.

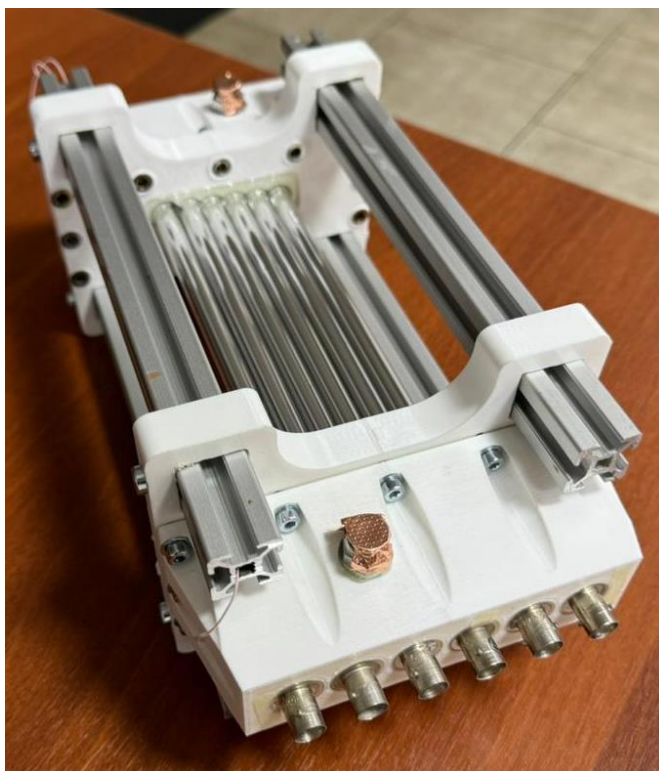


Рисунок 3.1.10.6. Фотография прототипа детектора.

Выводы экспериментального подтверждения технологии

С помощью новой технологии получен новый тонкоплёночный функциональный материал на основе карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Поверхность осаждаемого при температуре 50°C материала с применением ионного ассистирования, отличается хорошей гладкостью. Плотная мелкозернистая структура даёт такие свойства как высокая прочность и высокая эластичность. Плёночное покрытие обладает высокой гибкостью. Формирование покрытий из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на полимерных радиационно-стойких лавсановых (maylar) и полиимидных (Kapton) плёнках толщиной 20 - 30 мкм значительно расширяет разнообразие создаваемых детекторов нейтронов.

В настоящее время на основе этой технологии выполнено масштабирование лабораторной установки VSR300 до промышленной установки линейного продольного сканирования ВАТТ 800 с площадью подложки $700 \times 1200 \text{ мм}^2$, устанавливаемой в Опытно-экспериментальном участке (ОЭУ) изготовления детекторов нейтронов. Кроме этого, выполнена модернизация вакуумной установки VSR300-1 под нанесение карбида бора на рулонные полимерные материалы.

Испытания изготовленных из полученных полимерных плёнок детекторов нейтронов показали их работоспособность и возможность изготовления современных детекторов нейтронов, не уступающих лучшим зарубежным аналогам.

Оценка готовности технологии

Цель оценки готовности технологии – принятие решений в отношении дальнейшего развития технологии нанесения покрытий на основе B_4C на полимерные плёнки с высокой температурой плавления - полиимид (kapton) и лавсан (maylar).

Описание процесса оценки

Оценка готовности технологии (ОГТ) является структурированным, систематическим процессом, использующим уровень готовности технологии (УГТ) в качестве метрики, которая оценивает зрелость технологии или системы с её применением.

Оценка произведена в режиме самооценки. Для этого из числа сотрудников ОИЯИ была подобрана команда оценщиков из экспертов, обладающих знанием и опытом, и выполнен анализ на основании документов и имеющихся материалов. Оценка УГТ выполнена каждым оценщиком самостоятельно, исходя из уровня соответствия каждому пункту УГТ. Всего девять пунктов УГТ.

Расчет оценки соответствия по каждому пункту: 50%-85% частичное соответствие; 75%-100% полное соответствие. Общая оценка УГТ определяется единогласным решением по уровню полного соответствия.

Определение уровня готовности технологии

Определение уровня произведено исходя из заключения экспертов и сведено в таблицу 3.1.10.1.

Уровень готовности	Документация подтверждения	Оценка, %	комментарий
<p>УГТ1. Основные принципы технологии изучены и опубликованы.</p> <p>Сформулирована идея нанесения карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на полимерные плёнки с высокой температурой плавления большой площади при низких температурах за счёт применения ионного ассистирования.</p>	<p>Техзадание на разработку технологии</p>	100	<p>Технология основана на результатах технологии нанесения карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на алюминиевые листы большой площади при низких температурах</p>
<p>УГТ2. Сформулирована технологическая концепция.</p> <p>Обоснована необходимость и возможность создания новой технологии, в которой используется применение ионного ассистирования.</p>	<p>Техзадание на разработку технологии.</p> <p>Описание технологии и маркетинговое исследование, аналоги (в научной работе [3.1.10.3])</p>	100	<p>Концепция основана на дальнейшем развитии технологической концепции нанесения карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на алюминиевые листы большой площади при низких температурах</p>
<p>УГТ3. Даны аналитические и экспериментальные подтверждения по важнейшим функциональным характеристикам выбранной концепции технологии.</p> <p>Собран макет установки нанесения карбида бора на базе лабораторной вакуумной установки VSR300. Проведена тестовая проверка работоспособности концепции новой технологии в первых экспериментах по нанесению покрытий из карбида бора B_4C на полимерные плёнки с высокой температурой плавления. Получены тестовые результаты.</p>	<p>Техзадание.</p> <p>Описание технологии и анализ тестовых результатов (в научной работе [3.1.10.3])</p> <p>Протокол проведения исследований образцов плёнок карбида бора B_4C (в отчёте за 2022г)</p>	100	

<p>УГТ4. Компоненты и/или макеты испытаны в лабораторных условиях.</p> <p>Разработаны, изготовлены и испытаны держатели подложек из полимерных плёнок с высокой температурой плавления и включены в комплекс оборудования вакуумной установки VSR300, представляющей собой рабочую модель вакуумной установки нанесения покрытий. Получены опытные образцы покрытий $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на полимерных плёнках с высокой температурой плавления и свидетелях. Исследованы характеристики покрытий $^{10}\text{B}_4\text{C}$ по свидетелям.</p>	<p>Техзадание.</p> <p>Закуплены полиимидные плёнки и лавсановые плёнки, в том числе металлизированные алюминием (накладные)</p>	100	
<p>УГТ5. Компоненты и/или макеты испытаны в условиях, близких к реальным.</p> <p>На вакуумной установке VSR300 получены образцы конвертеров с покрытием $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на лавсановую (maular) плёнку размером 200x250мм толщиной 20мкм.</p> <p>Используя эти конвертеры сварены с помощью ультразвуковой сваркой строу-трубки диаметром 10 мм, изготовлены и испытаны газовые детекторы медленных нейтронов</p> <p>Создание прототипов строу-детекторов медленных нейтронов с твердотельным борным покрытием</p> <p>Создание многослойных детекторов нейтронов с твердотельным борным конвертером, состоящим из 6-</p>	<p>Техзадание.</p> <p>Отчёт по созданию прототипов строу-детекторов медленных нейтронов с твердотельным борным покрытием.</p> <p>Конструкторская документация.</p> <p>Акт изготовления.</p> <p>Акт испытаний.</p> <p>Отчёт по созданию и испытание многослойных детекторов нейтронов с твердотельным конвертером (состоящим из 6-ти строу-трубок с напылением $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на лавсановую плёнку).</p> <p>Конструкторская документация.</p>	100	

ти строу-трубок с напылением $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на лавсановую плёнку.	Акт изготовления. Акт испытаний.		
УГТ6. Модель или прототип системы/подсистемы продемонстрированы в условиях, близких к реальным. Разработана и изготовлена промышленная вакуумная установка ВАТТ 800 с площадью подложки до $700 \times 1200 \text{ мм}^2$	Техзадание. Договор на выполнение работ (ФерриВатт). Акт испытаний (ФерриВатт)	85	Оценка занижена вследствие отсутствия акта, подтверждающего работоспособность технологии на установке-ВАТТ800

Таблица 3.1.10.1. Уровень готовности технологии.

Заключение

Командой оценщиков из экспертов, обладающих знанием и опытом, выполнена оценка уровня готовности технологии нанесения тонкоплёночных покрытий из карбида бора B_4C на полимерные плёнки с высокой температурой плавления - полиимид (картон) и лавсан (maylar) на основании анализа документов и имеющихся материалов. Оценка УГТ выполнена каждым оценщиком самостоятельно, исходя из уровня соответствия каждому пункту УГТ. Предоставлено для оценки всего шесть пунктов УГТ. Расчет оценки соответствия по каждому пункту: 50%-85% частичное соответствие; 75%-100% полное соответствие. Общая оценка УГТ определяется единогласным решением по уровню полного соответствия.

Результат оценки уровня зрелости технологии – УГТ5.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [3.1.10.1] Francesco Piscitelli «Boron-10 layers, Neutron Reflectometry and Thermal Neutron Gaseous Detectors» arXiv:1406.3133v1 [physics.ins-det] 12 Jun 2014
- [3.1.10.2] Høglund S. *et al.* J. Appl Phys, 2012, Vol. 111(10), 104908, <https://doi.org/10.1063/1.4718573>
- [3.1.10.3] А.Г. Колесников и др. Формирование тонких пленок карбида бора, обогащенного изотопом ^{10}B , при низких температурах. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 5. С. 290–299. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.5.290.299>

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт определения уровня готовности технологии. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.10 Акт определения уровня готовности технологии.pdf](#)
- Отчет об оценке готовности технологии. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.10 Отчет об оценке готовности технологии.pdf](#)
- Распоряжение для оценки УГТ. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.10 Распоряжение для оценки УГТ.pdf](#)
- Распоряжение для разработки технологии. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.10 Распоряжение для разработки технологии.pdf](#)
- Техническое задание на разработку технологии. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.10 Техническое задание на разработку технологии.pdf](#)

3.1.11 Совместные с АО НИИТФА исследования характеристик образцов модернизированных детекторов нейтронов на основе конвертеров с тонкопленочным покрытием из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, изготовленных АО НИИТФА. Подготовка предложений по повышению эффективности детекторов нейтронов для применения на предприятиях РосАтом.

В ЛНФ ОИЯИ выполнено изготовление комплекта конвертеров с тонкопленочным покрытием из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на подложки из алюминиевых листов размером 280x380 мм толщиной 0.5 мм. Покрытие выполнено с помощью магнетронного распыления мишени из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Комплект подложек в количестве 6 (шесть) штук с разной толщиной покрытия – 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 мкм, передан АО НИИТФА для проведения сравнительных испытаний. АО НИИТФА изготовлены 7 опытных образцов коронных счётчиков, а именно: 6 образцов из переданных материалов и один образец, принимаемый за контрольный, из материала, покрытие которого выполнено по технологии нанесения суспензии аморфного бора ^{10}B , применяемой в АО НИИТФА. Силами АО НИИТФА проведены сравнительные исследования чувствительности образцов. На рисунке приведена схема экспериментальной установки. В качестве источника использовали источник тепловых нейтронов с выходом не менее 1×10^6 нейтр/сек. Счётчик, принимаемый за контрольный, размещали в блоке замедлителя экспериментальной установки и измеряли количество импульсов за время 600 сек. Затем в блоке замедлителя размещали поочередно все 6 исследуемых образцов и производились замеры количества импульсов за это же время.

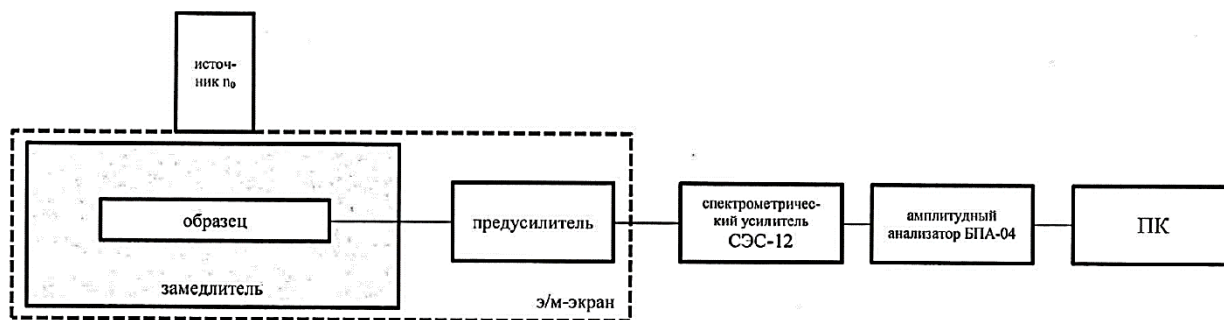


Рисунок 3.1.11.1. Схема экспериментальной установки.

Относительная чувствительность определялась по формуле:

$$\eta_{\text{отн}} = \frac{N_n}{N_{nk}}, \quad (3.1.11.1)$$

где $\eta_{\text{отн}}$ – относительная чувствительность экспериментальных образцов;

N_n – число зарегистрированных импульсов счётчика;

N_{nk} – число зарегистрированных импульсов счётчика, принятого за контрольный.

В ходе испытаний установлено, что максимальный прирост чувствительности в сравнении с покрытием, применяемом в АО НИИТФА, составил 32%.

ЛНФ ОИЯИ и АО НИИТФА провели совместное обсуждение результатов испытаний и выработали предложения по использованию изготавливаемых в ЛНФ конвертеров нейтронов на основе тонкопленочных покрытий из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ для применения на предприятиях РосАтом для изготовления детекторов нейтронов, имеющих более высокую эффективность регистрации нейтронов.

ЛНФ ОИЯИ и АО НИИТФА подготовили материалы для совместной публикации по результатам исследований.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Протокол испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.11 Протокол испытаний.pdf](#)

- Программа и методика испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.11 Программа и методика испытаний.pdf](#)
- Акт испытаний и предложения. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.11 Акт испытаний и предложения.pdf](#)

3.1.12 Работы исследователей в возрасте до 39 лет

Проведение экспериментальных исследований прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $ZnS/{}^6LiF$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей с апертурой не менее 100×100 мм² (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ)

В ходе работ по проекту на третьем этапе были проведены экспериментальные исследования прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $ZnS/{}^6LiF$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей с апертурой не менее 100×100 мм². Цель выполнения работы: провести экспериментальные исследования прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $ZnS/{}^6LiF$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей с апертурой не менее 100×100 мм², разработанного и созданного на 2 этапе проекта.

В ходе проведенных исследований была осуществлена проверка рабочих параметров прототипа в соответствии с методикой испытаний ДПЧС.01.00.00.00.000 МИ. Прототип двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $ZnS/{}^6LiF$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей с апертурой не менее 100×100 мм² в сборке представлен на рис. 3.1.12.1.



Рисунок 3.1.12.1. Прототип двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов.

Схема счетчика представлена на рис. 8. Принцип работы счетчика основан на оптическом ослаблении света. Нейтрон, падающий на сцинтиллятор, конвертируется в фотоны. Фотоны, попадающие в световод, распространяются во всех направлениях, и в зависимости от пройденного пути (L1, L2, L3, L4 на рис. 3.1.12.2) поглощаются. В конечном итоге за счет различного ослабления сигнала будут отличаться амплитуды сигналов, полученных с торцов световода.

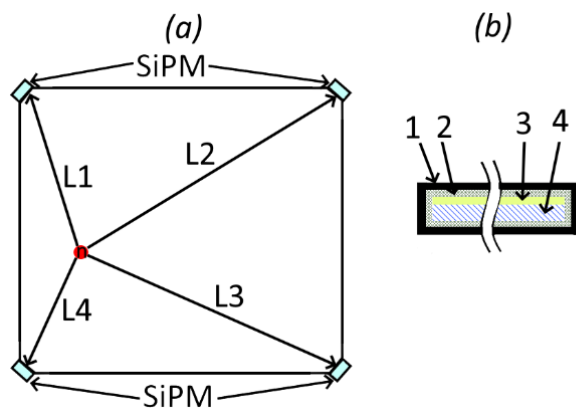


Рисунок 3.1.12.2. Схема двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов: а – схема размещения SiPM с направлениями движения фотонов; б – структура счетчика в разрезе, 1 – фторопластовая лента, 2 – светоотражающее покрытие, 3 – сцинтиллятор, 4 – световод.

Тестирование детектора производилось от источника нейтронов Cf^{252} . Быстродействие в данном исследовании определялось в первую очередь быстродействием усилителя, остальные составляющие на порядок меньше, чем время интегрирования усилителя. Исходя из времени интегрирования быстродействие составляет 1×10^6 нейтронов/сек.

Для получения сигнала каждый кремниевый фотоумножитель подключался к предусилителю. В качестве предусилителя использовался интегрирующий усилитель с постоянной формирования 1 мкс, максимальная загрузка кремниевого фотоумножителя – 1 МГц. Сигналы с предусилителей попадали на 8-канальный приемник аналоговых сигналов MPSD-8+, который сохранял форму импульсов для дальнейшего анализа. На рис. 3.1.12.3 представлен пример формы импульсов, полученных с предусилителей.

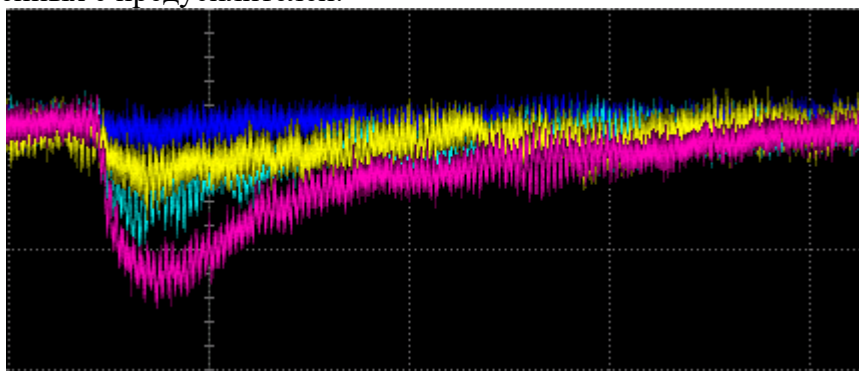


Рисунок 3.1.12.3. Пример формы импульсов, полученных с предусилителей.

На рис. 3.1.12.4 показано сравнение отношения амплитуд двух противоположных кремниевых фотоумножителей и сравнение их с модельными данными. Из экспериментальных данных получено разрешение около 7 мм по координате для счетчика $100 \times 100 \text{ мм}^2$.

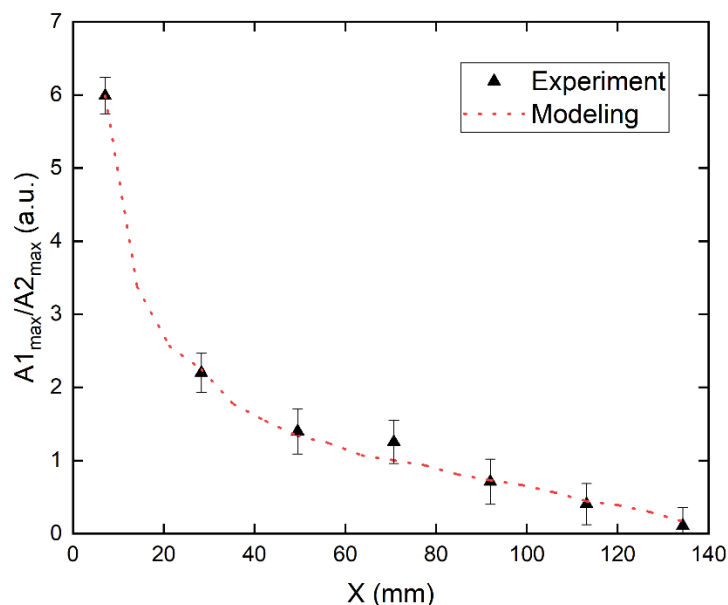


Рисунок 3.1.12.4. Сравнение экспериментальных и модельных спектров с двух противоположных кремниевых фотоумножителей.

В результате проведенных исследований было установлено, что объект исследований прототип двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей с апертурой не менее 100×100 мм², соответствует параметрам, обозначенным в методике исследований.

Результат проделанной работы представлен в приложениях.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Методика исследований. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.12 Методика исследований.pdf](#)
- Акт испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.12 Акт испытаний.pdf](#)
- Протокол исследований. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.12 Протокол исследований.pdf](#)
- Справка о выполнении работ до 39 лет. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.12 Справка о выполнении работ до 39 лет.pdf](#)

3.1.13 Работы, выполняемые за счет софинансирования из внебюджетных источников.

Калибровка одиночных детекторов нейтронов входящих в состав детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА» от радиоизотопного источника (совместно с ИЯИ РАН)

Также было проведено тестирования параметров детекторов на источнике нейтронов и параметров одиночных детекторов нейтронов входящих в состав детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА». Для проведения тестирования разработана программа ЛНИ.Э000 ПМ-2. Цель проведения тестирования – проверка параметров дифрактометра «СФЕРА», оценка эффективности и пороговых значений шумов, темнового шума и оценка параметров загрузки и максимальной скорости счета сборки детекторов.

Цель калибровки – оценка параметров разброса эффективности одиночных детекторов детекторной системы дифрактометра СФЕРА.

Калибровка проводится следующим образом:

- Производится подача питающего напряжение на детекторы и систему измерения.
- Записываются индивидуальные параметры порогов в предусилители для устранения темнового шума детекторов.

- Производится накопление данных в течении 1 минуты для получения параметров темнового шума.
- На месте образца размещается источник нейтронов ^{252}Cf .
- Производиться измерения счетов детекторов в течении 10 мин.

Дальнейшая обработка данных состоит в поиске детектора с максимальным счетом на каждом кольце, и расчете отклонений для каждого детектора по формуле

$$\varepsilon = 1 - \frac{N_{max}}{N_{det}}. \quad (3.1.13.1)$$

Полученные данные для коэффициентов показаны в прикрепленном приложении. Из них можно сделать вывод что отклонения эффективности одиночных детекторов составляют максимум 11%. Это позволяет сделать вывод что детекторы имеют хорошую повторяемость и разброс связан только с неоднородностью сцинтилляционного листа.

На рис. 3.1.13.1 показан внешний вид изготовленного дифрактометра.

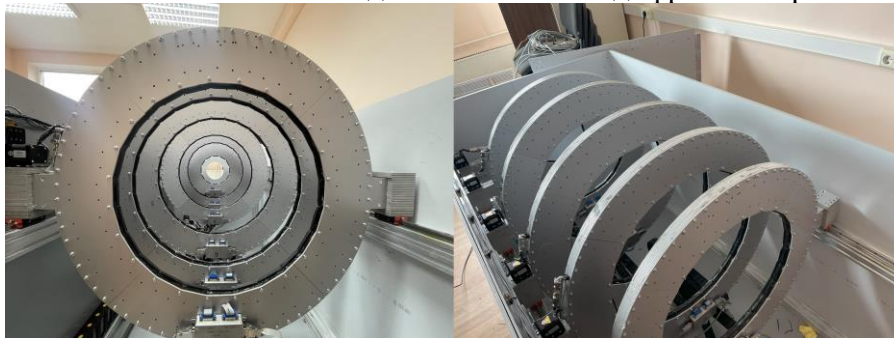


Рисунок 3.1.13.1. Внешний вид изготовленного дифрактометра

На данную схему дифрактометра получен патент [3.1.13.1].

На выполнение работ по п. 3.1.13 израсходовано 255 310 рублей из внебюджетных источников.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[3.1.13.1] Патент № 2796123 С1 Российская Федерация, МПК G01N 23/20. Широкодиапазонный кольцевой времяпролетный дифрактометр нейтронов с регулируемым разрешением: № 2022134286: заявл. 26.12.2022; опубл. 17.05.2023 / Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, В. С. Литвин [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Акт калибровки. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.13 Акт калибровки Калибровка одиночных детекторов нейтронов входящих в состав детекторной системы нейтронного дифрактометра СФЕРА от радиоизотопного источника.pdf](#)

3.1.14 Работы, выполняемые за счет финансирования из внебюджетных источников.

Проведение тестирования параметров одиночных детекторов нейтронов входящих в состав детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА» на источнике нейтронов (совместно с ИЯИ РАН)

В рамках работ 3 этапа была проведена калибровка детекторов от радиоизотопного источника. Цель калибровки – нормирование детекторов, находящихся на одном кольце для правильной работы дифрактометра в режиме определения текстуры, и оценка параметров разброса эффективности одиночных детекторов детекторной системы дифрактометра СФЕРА.

Для этого одиночные детекторы, входящие в состав дифрактометра “СФЕРА”, были установлены в установку ГЕРКУЛЕС источника ИН-06 ИЯИ РАН. В качестве образцов для исследования были использован сплав MoTiC. Полученные данные были обработаны методом Ритвельда. На рис. 3.1.14.1 показан пример обработанного спектра MoTiC. В результате исследования показано, что детекторы обладают высокой эффективностью, и позволяют получить достаточное разрешение для измерения реальных образцов [3.1.14.1].

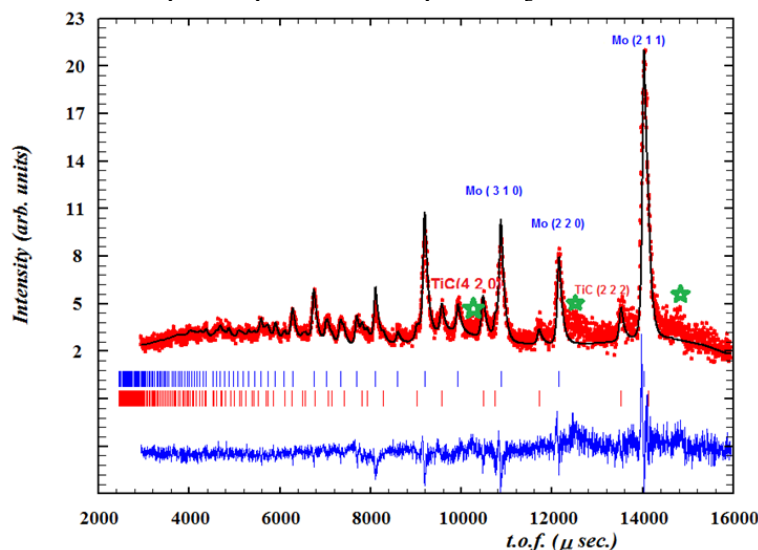


Рисунок 3.1.14.1. Пример спектра, обработанного методом Ритвельда сплава MoTiC.

На выполнение работ по п. 3.1.14 израсходовано 618 242,8 рублей из внебюджетных источников.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[3.1.14.1] Трунов Д.Н. Исследование жаропрочных объемных композитов MoTiC и MoTiC-W / Д.Н. Трунов, С.Н. Аксенов, В.С. Литвин [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — №10 (136). — URL: <https://research-journal.org/archive/10-136-2023-october/10.23670/IRJ.2023.136.2> (дата обращения: 10.11.2023). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.136.2

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Протокол тестирования. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.14 Протокол тестирования.pdf](#)
- Программа тестирования. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.14 Программа тестирования.pdf](#)
- Акт проведения тестирования. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.14 Акт проведения тестирования.pdf](#)

3.1.15 Работы, выполняемые за счет софинансирования из внебюджетных источников.

Приобретение комплектующих и оборудования, изготовление стендов, подготовка помещений, необходимых для создания прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200×200 мм² с пространственным разрешением не менее 2×2 мм² (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ).

На третьем этапе проекта были проведены работы, направленные на приобретение комплектующих и оборудования, изготовление стендов, подготовку помещений, необходимых для создания прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200×200 мм² с пространственным разрешением не менее 2×2 мм². На софинансирование данных работ были направлены средства из внебюджетных источников.

Цель выполнения работы: приобрести комплектующие и оборудование, изготовить стенды, подготовить помещения, необходимые для создания прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее $200 \times 200 \text{ мм}^2$ с пространственным разрешением не менее $2 \times 2 \text{ мм}^2$.

В результате выполнения работ была осуществлена закупка комплектующих и оборудования на основании договоров Заказчика НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ с Поставщиком ООО «Кор-Сервис»: договор №0588 от 11.09.2023 г., договор №0587 от 11.09.2023 г., договор №0763 от 06.10.2023 г.

Также были проведены подготовительные работы в лабораторных помещениях для создания прототипа на основании договора Заказчика НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ с Поставщиком: ИП «Оськин В.В.», договор №0618 от 27.07.2023 г.

Отчетная документация по проведенным работам, включающая Акт выполненных работ, документацию на поставку комплектующих и оборудования для создания прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры и бухгалтерскую справку, представлена в составе Отчета 3 этапа к № 148-100-1/2023 от 23 июня 2023 г. в рамках Соглашения № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. согласно п. 6.6 Приложения №3 к Договору, п. 3.1.15 Плана-графика и п. 2.5, п. 3.2.5 ТЗ к Договору.

На выполнение работ по п. 3.1.15 израсходовано 3 400 000 рублей из внебюджетных источников.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Дополнительное соглашение к договору. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.15 Доп согл №1 к Дог на выполнение рем работ №0618.pdf](#)
- Договорный документ №0763. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.15 Дог докум на поставку компл и оборуд №0763.pdf](#)
- Договорный документ №0588. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.15 Дог докум на поставку компл и оборуд №0588.pdf](#)
- Договорный документ №0587. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.15 Дог докум на поставку компл и оборуд №0587.pdf](#)
- Договорный документ №0618. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.15 Дог докум на выполнение рем работ №0618.pdf](#)
- Акт выполненных работ. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.15 Акт выполненных работ.pdf](#)

3.2.1 Реализация 4-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий. Поставка оборудования (часть 1).

В течение 3-го периода выполнения Проекта выполнялась реализация 4-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий. Выполнены работы по оснащению вакуумной установки магнетронного напыления, установленной в помещении 102 корпуса 119 Лаборатории нейтронной физики магнетронными мишенями с повышенным содержанием изотопа бора ^{10}B , что обеспечит увеличение эффективности детекторов нейтронов за счет повышенного содержания изотопа бора ^{10}B в конвертерных слоях детекторов разного типа. В рамках этих работ решены следующие задачи:

1. Синтезировано соединение додекаборид алюминия (AlB_{12}), имеющее повышенное содержание бора, используя природный аморфный бор с природным содержанием изотопа ^{10}B , в виде гранулированного порошка в количестве 0,5 кг.
2. Из нитрида бора (BN) изготовлены пресс-формы диаметром 130 мм толщиной 30 мм в количестве 4 шт для высокотемпературного прессования заготовок мишеней.
3. Получены пресс-заготовки мишеней из AlB_{12} с природным содержанием изотопа ^{10}B диаметром 130 мм толщиной 20 мм.
4. Выполнено высокотемпературное спекание в вакууме пресс-заготовки мишеней из AlB_{12} .

- Материал получен с содержанием примесей не более 0,8%. Плотность 1,7 г/см³.
5. Изготовлена наборная мишень AlB₁₂ размером 100x400x2 мм распилом заготовки на 8 пластин размером 100x50x2 мм.
 6. Синтезировано соединение додекаборид алюминия (AlB₁₂), содержащего бор, обогащенный изотопом ¹⁰B до 96%, в кол-ве 1 кг.
 7. Получены 2 шт. пресс-заготовки мишеней диаметром 130мм и толщиной 22 мм прессованием гранулированного порошка AlB₁₂, обогащенного ¹⁰B до 96%.
 8. Выполнено высокотемпературное спекание в вакууме пресс-заготовок мишеней из AlB₁₂, обогащенного ¹⁰B до 96%. Содержание примесей не более 0,8%. Плотность 1,72 г/см³.
 9. Изготовлена наборная мишень AlB₁₂ размером 100x400x5 мм распилом двух заготовок на 8 пластин размером 100x50x5 мм.
 10. Выполнен монтаж 2 комплектов составных мишеней 100x400 мм на соответственно две медные подложки магнетрона с применением в качестве бондажа (пайки) металлического индия. Крепление выполнено на подложки магнетронов установки магнетронного распыления, размещенной в корпусе 119 ЛНФ ОИЯИ.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Договорная документация 400-02205 и акты сдачи приемки. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.1 Договорная документация на выполнение работ 400-02205\(Изостер\) и Акты сдачи приемки.pdf](#)
- Договорная документация 400-01792 и акты сдачи приемки. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.1 Договорная документация на выполнение работ 400-01792\(ИП Лежнин\) и Акт сдачи приемки.pdf](#)
- Договор поставки ЭВ-755-2023 и УПД. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.1 Договор поставки ЭВ-755-2023\(Эрствак\) и УПД.pdf](#)
- Договор поставки 400-02246 и УПД. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.1 Договор поставки 400-02246\(ПриСТ\) и УПД.pdf](#)
- Договор поставки 400-02078 и УПД. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.1 Договор поставки 400-02078\(Пром медель\) и УПД.pdf](#)
- Договор поставки 400-02040, дополнительное соглашение и УПД. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.1 Договор поставки 400-02040\(Элком\) Доп согл и УПД.pdf](#)
- Договор поставки 400-02012 и УПД. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.1 Договор поставки 400-02012\(Норгау\) и УПД.pdf](#)

3.2.2 Работы, выполняемые за счет финансирования из внебюджетных источников.

Реализация 4-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий. Поставка оборудования (часть 2).

В рамках реализации 4-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий производилась закупка оборудования для комплектования инженерных систем ОЭУ. После проведения пуско-наладочных работ комиссией ЛНФ ОИЯИ Опытно-экспериментальный участок был принят в эксплуатацию.

На выполнение работ по п. 3.2.2 израсходовано 8 519 636 рублей из внебюджетных источников.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Договор поставки 400-02320 и товарная накладная. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.2 Договор поставки 400-02320\(ИП Савлюков\) и Товарная накладная.pdf](#)

- Договор поставки 400-02316, акт приема и товарная накладная. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.2 Договор поставки 400-02316\(ИП Рябухин\) Акт приема и Товарная накладная.pdf](#)
- Договор поставки 400-02262 и товарная накладная. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.2 Договор поставки 400-02262\(Техноальянс\) и Товарная накладная.pdf](#)
- Договор поставки 400-02024 и товарная накладная. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.2 Договор поставки 400-02024\(Алюмика\) и Товарная накладная.pdf](#)
- Акт сдачи в эксплуатацию. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.2 Акт сдачи в эксплуатацию.pdf](#)

3.3.1 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов естественно-научного профиля (совместно с К(П)ФУ)

Реализована дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов естественно-научного профиля. На программу зачислено 30 человек. Проведены учебные занятия в объеме 54 аудиторных часа (22 ч. лекционные, 28 ч. лабораторные, 4 ч. аттестация). Аттестовано 30 человек. Выданы удостоверения о повышении квалификации установленного образца.

Оповещение потенциальных слушателей программ ПК производилось путем размещения информации на сайте Института физики в разделе «Дополнительное образование» (<https://kpfu.ru/physics/dopolnitelnoe-obrazovanie-109398>), а также рассылкой информации по электронной почте руководителям профильных структурных подразделений К(П)ФУ и организаций Казани.

Открытие программ ПК осуществлялось на основании приказа проректора по образовательной деятельности, содержащего также информацию о сроках и стоимости обучения.

Запись на обучение осуществлялась по предоставлению письменного заявления и копий личных документов (паспорт, диплом о высшем образовании).

Очные лекционные занятия проводились в лекционных аудиториях Института физики (ул. Кремлевская, 16А). Для обеспечения возможности дистанционного участия слушателей и лекторов была организована онлайн-трансляция на платформе Яндекс 360. Оповещение участников образовательной программы о расписании, начале трансляции и ссылке для подключения осуществлялось посредством электронной почты на адреса, указанные обучающимися в заявлениях. Все необходимые материалы, оперативная информация, записи лекций размещены в папке «Синхротронные и нейтронные исследования», доступной по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/QTpUipXiilmeXg> (рис. 3.3.1.1).

Презентации лекций, тесты текущей и итоговой аттестации размещены на портале дистанционного образования К(П)ФУ, курс «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» (<https://edu.kpfu.ru/course/view.php?id=3289>). Доступ для сотрудников и обучающихся К(П)ФУ по корпоративному логину и паролю, сторонним лицам предоставлялся специальный доступ согласно утвержденному в К(П)ФУ порядку (рис. 3.3.1.2).

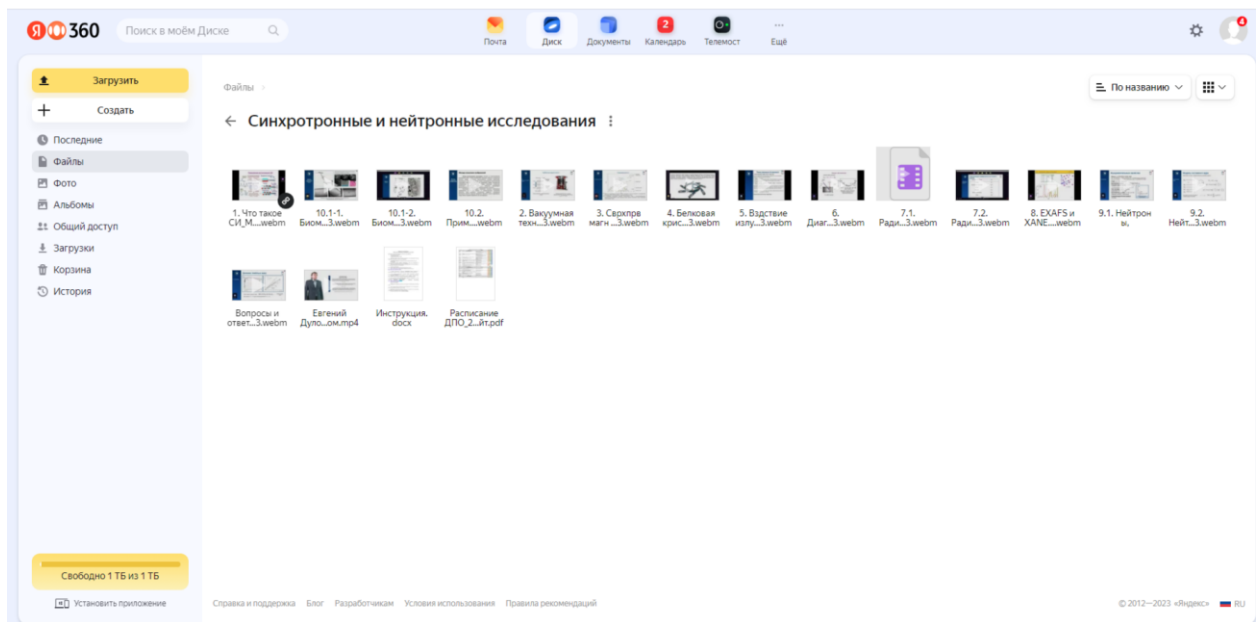


Рисунок 3.3.1.1. – Папка с материалами программ ПК на Яндекс диске.

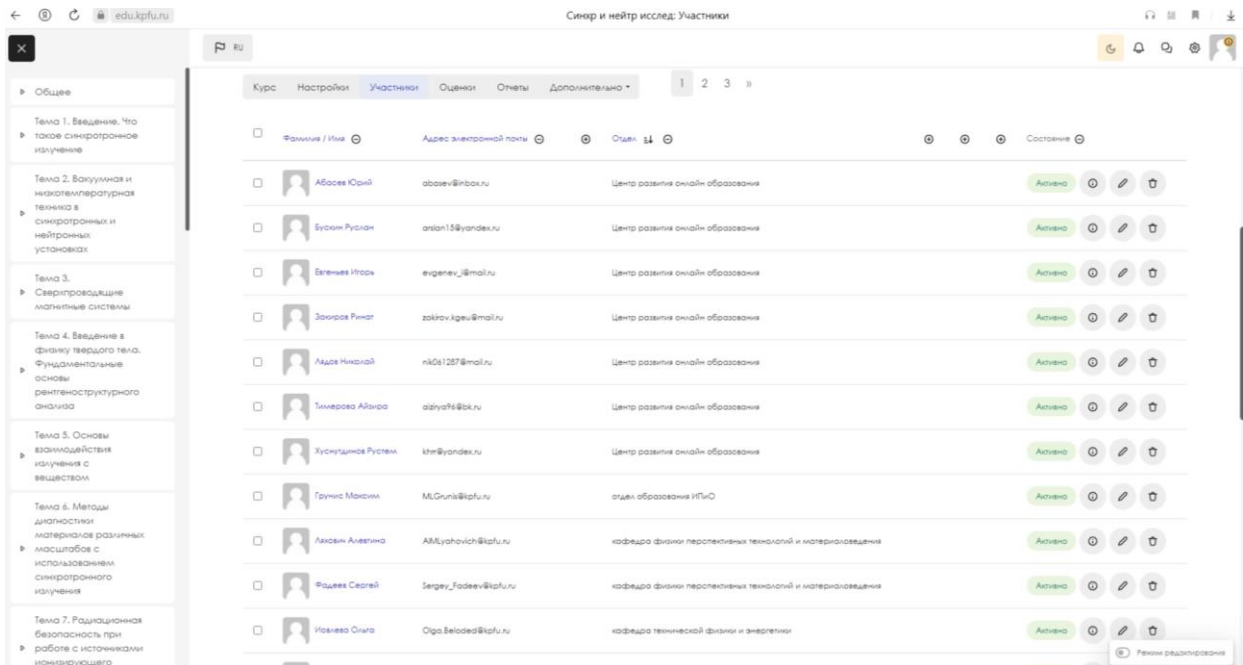


Рисунок 3.3.1.2. – Раздел «Участники» реализуемого курса ПК на платформе <https://edu.kpfu.ru> .

Лабораторные занятия проводились в учебных лабораториях Института физики: 603, 605, 606, 702, 703, 705, лаборатория ядерной физики. Отчеты о выполнении работ принимались и оценивались инженерами соответствующих лабораторий.

Итоговый контроль знаний по желанию обучающихся проводился дистанционно в автоматическом режиме на платформе <https://edu.kpfu.ru/> либо очно в письменном виде.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Данные удостоверений и ведомости аттестации о повышении квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для естественно-научного профиля. ФАЙЛ: Прил. ПГ 3.3.1 Данные удостоверений и ведомости аттестации естественно-научного профиля.pdf

3.3.2 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов биомедицинского профиля (совместно с К(П)ФУ)

Реализована дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов биомедицинского профиля. На программу зачислено 4 человека. Проведены учебные занятия в объеме 54 аудиторных часа (22 ч. лекционные, 28 ч. лабораторные, 4 ч. аттестация). Аттестовано 4 человека. Выданы удостоверения о повышении квалификации установленного образца.

Организация оповещения, приема документов, процесса обучения и аттестации проведена аналогично п. 3.3.1.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Данные удостоверений и ведомости аттестации о повышении квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для биомедицинского профиля. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.2 Данные удостоверений и ведомости аттестации биомедицинского профиля.pdf](#)

3.3.3 Реализация дисциплины "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" образовательной программы высшего образования магистратуры 03.04.02 "Физика" и раздела «Синхротронное и нейтронное излучения» дисциплины «Радиационная физика в биомедицине» образовательной программы высшего образования бакалавриата 12.03.04 "Биотехнические системы и технологии" для студентов естественнонаучного профиля (совместно с К(П)ФУ)

В отчетном периоде разработан и утвержден новый учебный план образовательной программы магистратуры направления 03.04.02 «Физика», профиль «Физика перспективных материалов» приема 2023 года, куда в качестве факультативной была внедрена дисциплина «Проведение синхротронных и нейтронных исследований». Программа дисциплины разработана в соответствии с программой дисциплины ВО для естественно-научного профиля, подготовленной на 2-м этапе работ. Дисциплина реализована в первом (осеннем) семестре 2023-24 учебного года, обучено и аттестовано 15 человек.

Параллельно разработке программ, установленных требованиями Технического задания и Плана-графика 2-го и 3-го этапов работ, в качестве апробации разработанных типовых программ были модернизированы программы дисциплин, реализуемых в К(П)ФУ учебных планов образовательных программ высшего образования. Изменения связаны с внедрением в программы тематического раздела, соответствующего профилю образовательного направления обучающихся, объему выделяемых на дисциплину часов и достигаемым компетенциям. Итогом данной работы стала реализация в первом полугодии 2023 г. программы дисциплины «Радиационная физика в биомедицине» для направления подготовки бакалавриата 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» с включением раздела «Синхротронное и нейтронное излучения» для студентов естественно-научного профиля. Обучено и аттестовано 13 человек.

Всего в 2023 г. обучено и аттестовано 28 студентов естественнонаучного профиля.

Обе группы студентов были подключены к цифровому образовательному ресурсу «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» (<https://edu.kpfu.ru/course/view.php?id=3289>), разработанному в рамках выполнения работ на предыдущих этапах.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Программа дисциплины «Радиационная физика в биомедицине». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.3 Программа дисциплины Рад физика в биомед.pdf](#)

- Программа дисциплины «Проведение синхротронных и нейтронных исследований». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.3 Программа дисциплины Проведение синх и нейтр исследований.pdf](#)
- Ведомость дисциплины «Радиационная физика в биомедицине». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.3 Ведомость Рад физика в биомед.pdf](#)
- Ведомость дисциплины «Проведение синхротронных и нейтронных исследований». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.3 Ведомость Проведение синхр и нейтр исследований.pdf](#)

3.3.4 Реализация раздела "Применение синхротронного и нейтронного излучения в практической медицине и в области биологических наук" дисциплин "Общая и медицинская радиобиология. Физические основы лучевой диагностики и терапии», "Ядерная медицина" образовательных программ высшего образования специалитета 30.05.01 "Медицинская биохимия", 30.05.02 "Медицинская биофизика" для студентов биомедицинского профиля (совместно с К(П)ФУ).

В качестве апробации разработанных на предыдущих этапах типовых программ для студентов биомедицинского направления нами были модернизированы программы дисциплин, реализуемых в К(П)ФУ учебных планов образовательных программ высшего образования. Изменения связаны с внедрением в программы тематического раздела, соответствующего профилю образовательного направления обучающихся, объему выделяемых на дисциплину часов и достигаемым компетенциям. Итогом данной работы стала реализация в 2023 г. следующих программ дисциплин для студентов биомедицинского профиля:

- «Общая и медицинская радиобиология. Физические основы лучевой диагностики и терапии» с включением раздела «Применение синхротронного и нейтронного излучения в практической медицине и в области биологических наук» для специалитета 30.05.02 «Медицинская биофизика» (прием 2020 г.); обучено и аттестовано 6 человек;

- «Общая и медицинская радиобиология. Физические основы лучевой диагностики и терапии» с включением раздела «Применение синхротронного и нейтронного излучения в практической медицине и в области биологических наук» для специалитета 30.05.01 «Медицинская биохимия» (прием 2021 г.) обучен и аттестован 1 человек;

- «Ядерная медицина» с включением раздела «Применение синхротронного и нейтронного излучения в практической медицине и в области биологических наук» для специалитета 30.05.02 «Медицинская биофизика» (прием 2018 г.) обучено и аттестовано 11 человек.

Всего в 2023 г. обучено и аттестовано 18 студентов биомедицинского профиля.

При проведении занятий и организации текущего контроля был задействован цифровой образовательный ресурс «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» (<https://edu.kpfu.ru/course/view.php?id=3289>), разработанный нами в рамках выполнения работ по 2-му этапу проекта.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Программа дисциплины «Ядерная медицина». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.4 Программа дисциплины Ядерная медицина.pdf](#)
- Программа дисциплины «Общая и медицинская радиобиология. Физические основы лучевой диагностики и терапии» для специалитета 30.05.01 «Медицинская биохимия». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.4 Программа дисциплины Общ и мед радиобиология \(Мед биохим\).pdf](#)
- Программа дисциплины «Общая и медицинская радиобиология. Физические основы лучевой диагностики и терапии» для специалитета 30.05.02 «Медицинская биофизика». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.4 Программа дисциплины Общ и мед радиобиология \(Мед биофиз\).pdf](#)
- Копии локальных нормативных актов К(П)ФУ. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.4 Копии локальных нормативных актов К\(П\)ФУ.pdf](#)
- Ведомость дисциплины «Ядерная медицина». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.4 Ведомость Ядерная медицина.pdf](#)

- Ведомости дисциплины «Общая и медицинская радиобиология. Физические основы лучевой диагностики и терапии». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.4 Ведомости Общ и мед радиобиология.pdf](#)

3.3.5 Разработка образовательной программы высшего образования «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для студентов археологического профиля (совместно с К(П)ФУ)

Современные сложные физические методы исследования материалов все больше внедряются в сферы, кажущиеся весьма далекими от технических наук. Тем не менее именно такие методы позволяют разрешать задачи гуманитарных областей знаний, долгое время неподдающиеся решению профильным специалистам. К таковым относятся, например, исследования объектов культурного наследия. Ввиду этого наряду с повышением квалификации обязательным элементом образовательной программы высшего образования любого историко-культурного направления должен быть блок, дающий представление о технических инструментах исследований, стоящих на переднем крае науки.

Для реализации данной цели, учитывая специфику разработки учебных планов ОП ВО по направлениям магистратуры и предполагаемый круг решаемых выпускниками задач, разработана типовая программа для студентов археологического профиля на примере программы дисциплины «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для укрупненной группы направлений магистратуры 46.04.00 «История и археология». Программа предполагает очную форму обучения. Но в ней заложены элементы, позволяющие в части занятий при необходимости использовать дистанционные образовательные технологии.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Образовательная программа «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для студентов археологического профиля. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.5 Образовательная программа для студентов археологического профиля.pdf](#)

3.3.6 Актуализация перечня на 2023/2024 учебный год научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории (совместно с МФТИ)

В рамках поисковой научно-исследовательской работы лаборатории перспективных технологий мегасайенс МФТИ за время реализации проекта определены приоритетные тематики, по которым будет проводиться обучение перспективным технологиям моделирования и создания детекторов нейтронов (тонкостеночные дрейфовые трубки, детекторы ультрахолодных нейтронов, микроструктурные газоразрядные детекторы и др.), узлов ускорителей и источников нейтронов, разработке программного обеспечения моделирования и анализа данных для проектирования и работы на исследовательских станциях нейтронных источников. Осваиваемые обучающимися методы являются современными и универсальными и позволят выпускникам вовлекаться в научную работу исследовательских организаций уже на этапе работы над выпускными квалификационными работами бакалавриата и магистратуры, а также выстраивать траекторию научной карьеры, продолжив работу в выбранных направлениях в аспирантуре. К руководству научно-исследовательскими работами привлекаются ведущие ученые ОИЯИ, ведется работа по привлечению ученых и экспертизы ведущих исследовательских центров и коллабораций, которые внесут вклад в разработку перспективных технологий и решений применительно для исследований с использованием источников нейтронов (ESS, ILL, NA62, NA64, DONE, SHIP и др.).

Направление 1: Моделирование много-связанных физических систем с использованием классических подходов математической физики и методов глубокого обучения на архитектуре графических процессоров (GPU).

Рассматриваются так называемые связанные системы (couple problem), в математическом описании которых участвуют несколько постановок задач из различных областей физики. Например, обмотка с током в сверхпроводящем магните. Процесс охлаждения обмотки приводит к ее деформации (уравнение теплопроводности). Изменение геометрии обмотки приводит к перераспределению магнитного поля, которое она создает (уравнения Максвелла). Магнитное поле приводит к возникновению силы Ампера, которая дополнительно деформирует форму обмотки. В результате, возникает задача расчета напряженно-деформированного состояния. При этом весь процесс может являться нестационарным. Полученные результаты используются при моделировании процессов, происходящих в топливных элементах и узлах перспективных источников нейтронов.

Направление 2: Проектирование и разработка программных комплексов для моделирования и оптимизации нелинейных систем, описывающих динамику пучка заряженных частиц в ускорительных установках.

Создание и оптимизация современных ускорительных комплексов, таких как коллайдеры, синхротроны и циклотроны, требует предварительного математического моделирования с высокой степенью реалистичности. Достижение такой цели возможно путем построения математической и компьютерной модели с учетом как можно большего числа параметров и деталей проектируемой установки. Каждый узел установки требует создания для него своей математической модели, которая из-за высокой степени нелинейности уравнений, описывающих ее, требует многократного тестирования в различных режимах. Помимо детальной проработки каждого узла необходима комплексная оптимизация всей системы, то есть выполнение сквозных расчетов динамики пучка, проходящего от точки инжекции до системы вывода.

Направление 3: Интеграция современных систем распределенной обработки Больших Данных для экспериментов по высокоинтенсивному столкновению частиц.

Обработка и анализ экспериментальных, а зачастую и моделированных данных, являются неотъемлемой частью экспериментов на ускорительных установках. Для современных научных исследований характерно оперирование огромными объемами данных, регистрируемых в ходе высокоинтенсивных столкновений частиц в эксперименте, которые необходимо достаточно быстро обработать и своевременно получить физический результат, соответствующий поставленной цели. Современные вычислительные комплексы характеризуются гетерогенностью по программным и аппаратным ресурсам и географической распределенностью, в связи с чем в данной работе решается задача разработки и внедрения программного решения, базирующегося на современных системах обработки и управления Большими Данными, для распределенной обработки данных, получаемых на установке эксперимента. Комплексное решение поставленной задачи включает интеграцию системы распределенного запуска и управления задачами обработки Больших Данных, внедрение Каталога файлов с данными событий эксперимента, разработку сервиса автоматизации распределенной обработки потока данных эксперимента с учетом выбранных систем.

Направление 4: Разработка и развитие интерфейса системы электронного журналирования для операторов смен идущих сеансов физического эксперимента

Во время сеансов физических экспериментов важное значение для понимания регистрируемых событий имеют не только данные, собираемые с детекторов, но и записи в журналах операторами смен, описывающие текущие параметры и режимы работы различных систем и детекторов эксперимента во время сеансов и различные типы произошедших событий, а также проблемы и предпринятые действия. Для решения данной задачи разрабатывается система электронного журналирования, предоставляющая сотрудникам смен интерфейс для записи во время сеансов эксперимента данной информации, а также предназначенная для удобного просмотра, корректировки и поиска требуемой информации в журнале членами коллаборации эксперимента. Система электронного журналирования использует базу данных для хранения и работы с данными журнала эксперимента и обеспечения корректного многопользовательского доступа, согласованности, целостности данных и автоматического резервного копирования данных журнала на случай ошибок программного обеспечения или аппаратных сбоев. В рамках данной работы необходимо провести доработку реализованного прототипа интерфейса системы журналирования для внесения и предоставления другим членам эксперимента информации о режимах работы,

произошедших событиях и возникших проблемах во время работы, а также расширить функциональные возможности веб-приложения и связанных с ним сервисов и систем.

Направление 5: Разработка и внедрение современной системы визуализации и мониторинга событий столкновения частиц физического эксперимента

Графическое представление и мониторинг событий столкновения частиц, регистрируемых детекторными системами, являются важной частью и применяются во всех современных, крупных физических экспериментах. Такие системы визуализации событий используются на этапе проектирования и обработки полученных данных для проверки и отладки моделей, а также алгоритмов обработки данных, для визуализации данных реконструкции и физического анализа, а также требуются для мониторинга и контроля выборочных событий эксперимента в режиме онлайн, то есть во время идущего эксперимента. В рамках работы для решения данной задачи необходимо спроектировать и разработать систему визуализации и мониторинга событий столкновения частиц физического эксперимента, которая позволяет графически отображать и управлять геометрией детекторов, модельной информацией (точками, треками частиц) и реконструированными данными (хитами, треками, сработавшими башнями калориметров) как во время, так и после сеансов эксперимента. Данная система должна обеспечивать интерактивность: повороты, масштабирование, выбор и настройку отдельных объектов. Монитор событий физического эксперимента строится согласно клиент-серверной архитектуре с возможностью просмотра членами эксперимента данных событий посредством веб-браузера.

Направление 6: Проектирование и разработка сервиса мониторинга и автоматизированного восстановления функционирования программных систем обработки данных и информационных служб физического эксперимента.

Для современных физических экспериментов характерны большая длительность, высокая сложность и трудоемкость, огромная инфраструктура программного и аппаратного обеспечения, что повышает вероятность какого-либо сбоя во время работы подсистем эксперимента. Для минимизации времени реакции и восстановления различных программных и информационных систем в случае аппаратных или программных проблем важно следить за состоянием данных подсистем, что особенно критично во время проведения сеансов эксперимента. Для решения данной задачи необходима реализация сервиса мониторинга и восстановления, предназначенного для отслеживания состояния задействованных аппаратных узлов, информационных систем и других программных компонент, хранения и визуализации параметров их состояния на централизованном ресурсе, а в случае сбоев оперативного восстановления их работы. В разработке данного сервиса можно выделить два основных этапа. Первый – разработка подсистемы диагностики, которая непрерывно производит мониторинг работы аппаратных узлов, программных систем и служб эксперимента, собирает и визуализирует соответствующие статистические данные, а в случае не пройденных тестов высылает соответствующие уведомления об ошибке ответственному за систему персоналу. Второй этап – реализация подсистемы автоматизированного восстановления приведенным систем, то есть репликация и разворачивание реплицированной системы эксперимента на резервном узле в случае потери работоспособности основной.

Все представленные направления предложены обучающимся МФТИ для проведения научно-исследовательской работы в рамках созданной лаборатории.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Перечень НИР 2023. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.6 Перечень НИР 2023.pdf](#)

3.3.7 Ресурсное и инфраструктурное обеспечение в 2023 г. научно-образовательной лаборатории для реализации выполнения научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории (совместно с МФТИ)

За период реализации проекта в рамках развития инфраструктуры научно-образовательной лаборатории приобретены материалы, комплектующие и оборудование, в том числе для

конструирования экспериментального стенда для тестирования тонкостеночных дрейфовых трубок, детекторов ультрахолодных нейтронов, микроструктурных газоразрядных детекторов и др. на космических мюонах, а также работ по разработке программного обеспечения моделирования и анализа данных (ROOT, Geant4, GARFIELD, FPGA и др.) для проектирования и работы на исследовательских станциях нейтронных источников.

Разрабатываемая система позволяет выполнять исследовательскую работу по разработке систем детектирования, в которых необходимо учитывать многие параметры, такие как выбор и оптимизация геометрии детекторов, их координатное разрешение и эффективность детектора заряженных частиц в магнитном поле, разрабатывать методы тестирования и отладки модулей детектирования, доказательства их радиационной стойкости и разработки считывающей электроники.

Конструируемый экспериментальный стенд включает в себя следующие подсистемы:

- система запуска, состоящая из трех сцинтилляционных детекторов. Два из них с рабочей площадью 145×145 мм² считываются кремниевыми фотоумножителями (SiPM), третий уровень размером 40×40 см² считывается фотоэлектронным умножителем и находится за свинцовым фильтром толщиной 37 см;

- калориметр для повышения точности измерений и возможности оцифровки событий, инициированных энергией, интегрированный в общую систему сбора данных;

- высокоточный детектор силиконовой ленты с прямым основанием.

Разрабатываемый стенд использует для отладки систему сбора данных, отработанную на эксперименте VM@N (рис. 3.3.7.1). Система сбора данных включает в себя два шестидесяти четырехступенчатых время-цифровых преобразователя, подключенных к усилителям Strow-детектора, три аналогово-цифровых преобразователя в комплекте с секвенсором в качестве считывающей электроники микростриповых детекторов, модуль формирования триггера, крейт-контроллер, разветвитель триггерного сигнала, триггерный модуль и модуль управления набором данных.

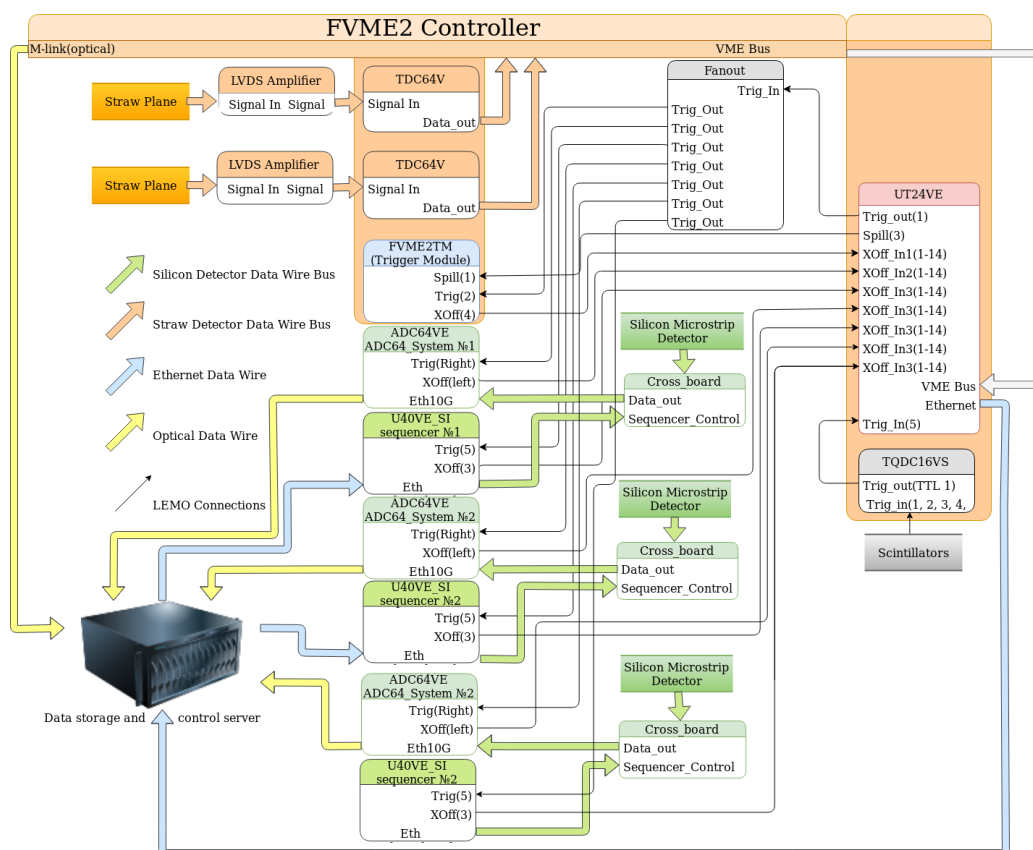


Рисунок 3.3.7.1. Структурная схема системы сбора данных стенда.

Разработанный стенд для тестирования тонкостеночных дрейфовых трубок, детекторов ультрахолодных нейтронов, микроструктурных газоразрядных детекторов и др. на космических мюонах, а также работ по разработке программного обеспечения моделирования и анализа данных представлен на рис. 3.3.7.2. В настоящее время стенд проходит наладку и тестирование на базе ЛФВЭ ОИЯИ. Работа со стендом будет включена в проектную деятельность студентов в рамках общеинститутского курса общей физики и специализированные курсы базового цикла обучения.

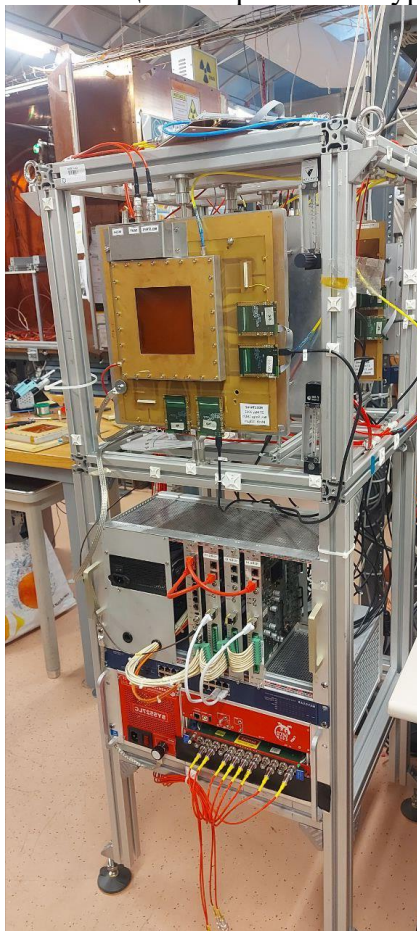


Рисунок 3.3.7.2. Экспериментальный стенд для тестирования тонкостеночных дрейфовых трубок, детекторов ультрахолодных нейтронов, микроструктурных газоразрядных детекторов и др. на космических мюонах.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Сведения о затратах средств. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.7 Сведения о затратах средств.pdf](#)

3.3.8 Реализация в 2023 г. научно-исследовательских работ (практик) студентов и аспирантов в рамках работы научно-образовательной лаборатории (совместно с МФТИ).

За время реализации проекта в рамках развития образовательной деятельности сотрудником лаборатории д.ф.-м.н. Перепелкиным Евгением Евгеньевичем разработан курс «Параллельное программирование на графических процессорах в задачах теоретической и математической физики». Курс лекций рассчитан на широкий круг студентов, аспирантов и специалистов в различных областях математического моделирования и теоретической физики, для которых программирование не является основной специальностью, а используется ими как дополнительный инструмент в численном моделировании исследуемых задач. В курсе изложены базовые знания, необходимые, чтобы быстро и эффективно начать писать программы на графическом процессоре (GPU) без специальной подготовки в области программирования. Курс преследует цель изложить материал на простом доступном уровне, в первую очередь, пользователям, занимающимся прикладными задачами. Важным аспектом курса является включение в состав курса задач, в том

числе используемых при моделировании процессов, происходящих в топливных элементах и узлах перспективных источников нейтронов, а также ряда других прикладных задач моделирования узлов станций и источников нейтронов. Курс в формате факультатива читается студентам МФТИ в осеннем семестре 2022/2023 и 2023/2024 учебных годов.

В 2023 году в рамках проекта разработан онлайн-курс «Современные синхротроны и области их практического применения в материаловедении и структурной биологии».

Глобальной целью курса является его использование в образовательном процессе подготовки специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня, в том числе: разработка и реализация образовательных программ высшего образования и дополнительных профессиональных программ, направленных на создание прорывных технологических решений с применением синхротронных и нейтронных источников.

Курс знакомит обучающихся со свойствами синхротронного излучения, позволяющими проводить с его помощью исследования, недоступные для лабораторных рентгеновских установок.

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны:

Знать: Возможности использования синхротронного излучения для изучения биологических и других образцов; Ограничения в достижимом пространственном и временном разрешении, связанные со свойствами используемых пучков излучения; Устройство экспериментальных станций на современных источниках синхротронного излучения и назначение их основных элементов

Уметь: Применять знания о возможностях использования синхротронного излучения для изучения биологических образцов для решения фундаментальных профессиональных задач; Творчески использовать в научной деятельности знания об ограничениях в достижимом пространственном и временном разрешении, связанных со свойствами используемых пучков излучения, для решения задач структурной биологии; Выделять и систематизировать основные идеи в научных текстах; Критически оценивать любую поступающую информацию, вне зависимости от источника; Генерировать новые идеи и методические решения; Осуществлять проектирование своей научной деятельности; Представлять свои научные результаты в устных докладах.

Владеть: Методами теоретического и экспериментального исследования; Навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных), обработки, анализа и систематизации информации; Навыками критического анализа и оценки современных научных достижений.

Курс состоит из 20 видеороликов, суммарной длительностью около 6.5 часов. Включает проверочные задания в виде задач к каждому видеоуроку, а также итоговый тест. Общая продолжительность курса составляет 6 недель.

Курс размещен на национальной платформе «Открытое образование» и доступен по ссылке <https://openedu.ru/course/mipt/synchrotron/>

Разработанный онлайн-курс является ресурсным обеспечением научно-образовательной лаборатории для реализации научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории для дальнейшего использования в научном и образовательном процессах.

Структура и содержание курса:

Блок	Тема	Содержание
1. Синхротронное излучение, его получение и свойства	1.1. Свойства и получение пучков рентгеновского излучения	<i>Введение. Основные свойства рентгеновского излучения. Диапазоны рентгеновского излучения.</i>
		<i>Геометрические параметры пучков излучения: размер источника, расходимость. Спектральная ширина. Яркость.</i>

	<i>Электромагнитное излучение осциллирующего заряда. Учет доплеровского эффекта в случае релятивистского заряда. Ондюлятор.</i>
1.2. Излучение электрона в кольцевом накопителе	<i>Устройство кольцевого накопителя заряженных частиц. Движение и излучение электрона в поворотном магните в нерелятивистском и релятивистском случае: циклотронное и синхротронное излучения.</i>
	<i>Диаграмма направленности синхротронного излучения: связь с релятивистским преобразованием координат. История открытия синхротронного излучения.</i>
1.3. Синхротронное излучение поворотного магнита	<i>Длительность импульса и спектр синхротронного излучения поворотного магнита. Критическая энергия. Использование синхротронного излучения поворотных магнитов в накопителях.</i>
	<i>Функциональная зависимость спектра синхротронного излучения поворотного магнита. Угловая плотность и яркость излучения.</i>
1.4. Синхротронное излучение ондулятора: спектральные свойства	<i>Ондулятор как основное устройство генерации синхротронного излучения на источниках 3-го и 4-го поколения. Спектр излучения ондулятора как интерференционная картина.</i>
	<i>Особенности спектра ондуляторного излучения: энергия, интенсивность и спектральная ширина гармоник. Связь с физическими параметрами ондулятора.</i>
	<i>Формулы для оценки спектральных параметров ондуляторного излучения. Особенности траектории электрона в ондуляторе, параметр ондуляторности.</i>
	<i>Управление спектром ондуляторного излучения.</i>
1.5. Синхротронное излучение ондулятора: пространственные свойства	<i>Пространственные характеристики ондуляторного излучения. Понятие центрального конуса монохроматического излучения ондулятора.</i>
	<i>Расходимость центрального конуса ондуляторного излучения. Размер источника и эмиттанс ондуляторного излучения в дифракционном пределе.</i>
1.6. Синхротронное излучение в реальных накопителях	<i>Ондуляторное излучение в реальных накопителях. Влияние эмиттанса электронного пучка на спектр ондуляторного излучения. Вигглеры. Поколения источников синхротронного излучения.</i>
	<i>Влияние эмиттанса электронного пучка на геометрические параметры пучков ондуляторного излучения. Понятие дифракционно ограниченного источника.</i>
1.7. Некоторые особенности ондуляторного излучения	<i>Четные гармоники в спектре ондулятора. Спектр ондуляторного излучения в случае конечной апертуры.</i>
	<i>Поляризация синхротронного излучения. Получение произвольно (линейно, эллиптически и циркулярно) поляризованных пучков на источниках синхротронного излучения.</i>

	1.8. Временная структура синхротронного излучения	<i>Особенности временной структуры синхротронного излучения в кольцевых накопителях: длительность и скважность импульсов, ограничения на временное разрешение экспериментов.</i>
	1.9. Источники синхротронного излучения 4-го поколения	<i>Конструктивные особенности накопителей для источников синхротронного излучения 4-го поколения.</i>
2. Рентгеновские лазеры на свободных электронах	2.1. Рентгеновские лазеры на свободных электронах	<i>Рентгеновские лазеры на свободных электронах: понятие когерентной эмиссии излучения электронным сгустком, механизм структурирования электронного сгустка.</i>
		<i>Устройство рентгеновского лазера на свободных электронах и спектральные особенности его излучения. Режимы самоусиленной спонтанной эмиссии (SASE) и усиления затравочного излучения.</i>
	2.2. Когерентные свойства синхротронного излучения	<i>Волновые свойства пучков синхротронного излучения. Понятия продольной и поперечной длин когерентности, степени когерентности. Дифракционно ограниченные пучки как полностью когерентные.</i>
3. Использование синхротронного излучения	3.1. Методы исследования вещества с помощью синхротронного излучения	<i>Разнообразие методик исследования вещества с помощью синхротронного излучения.</i>
		<i>Общая схема эксперимента с использованием пучка излучения/частиц.</i>
		<i>Классификация методов исследования вещества с использованием пучков излучения.</i>
		<i>Упругое рассеяние.</i>
		<i>Неупругое рассеяние.</i>
		<i>Понятие вектора переноса импульса.</i>
		<i>Сечения процессов рассеяния и поглощения на примере рентгеновского излучения.</i>
		<i>Процессы с испусканием вторичного излучения. Характеристическая рентгеновская эмиссия и Оже-процесс.</i>
	3.2. Понятие сигнала в методах исследования вещества с помощью синхротронного излучения	<i>Понятие сигнала в методах исследования вещества с помощью пучков излучения. Переменная сигнала.</i>
		<i>Примеры методик с разрешением сигнала в пространстве, по углу и по энергии: сканирующая рентгеновская микроскопия, рентгеновская дифракция, рентгеновская спектроскопия поглощения.</i>
	3.3. Понятие разрешения в методах исследования вещества с помощью синхротронного излучения	<i>Ограничения методик, связанные с разрешением сигнала. Инструментальная функция, функция рассеяния точка.</i>
<i>Ограничения методик, связанные с разрешением сигнала по интенсивности. Статистика Пуассона.</i>		
<i>Критерий Розе в методиках визуализации.</i>		

4. Методики рентгеновской микроскопии	4.1. Сканирующая и полнопольная рентгеновская микроскопия	<i>Сканирующая рентгеновская микроскопия и ее предельное пространственное разрешение.</i>
		<i>Полнопольная рентгеновская микроскопия и ее предельное пространственное разрешение.</i>
	4.2. Абсорбционный и фазовый контрасты в рентгеновской микроскопии	<i>Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом в методах микроскопии. Комплексный показатель преломления.</i>
		<i>Контраст поглощения и минимальная экспозиция.</i>
		<i>Понятие фазового контраста в рентгеновской микроскопии. Преимущества фазового контраста и подходы к его получению: рентгеновская микроскопия Цернике, дифференциальный и осевой фазовый контраст.</i>
	4.3. Понятие необходимой и предельной дозы в рентгеновской микроскопии	<i>Томография.</i>
<i>Соотношения между предельно допустимой дозой и минимальной экспозицией в методиках визуализации биологических объектов.</i>		
5. Методики рентгеновской дифракции	5.1. Дифракционный подход к визуализации микрообъектов, когерентная дифракционная микроскопия	<i>Рентгеновская дифракция. Связь дифракционной картины с Фурье-образом объекта.</i>
		<i>Природа ограничения разрешения методик микроскопии с точки зрения Фурье-преобразования. Когерентная дифракционная рентгеновская микроскопия и алгоритм восстановления фаз.</i>
		<i>Инструментальные требования к методике когерентной дифракционной микроскопии.</i>
		<i>Использование методики для биологических объектов.</i>
6. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом	6.1. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом: рассеяние свободными электронами	<i>Отличие формализма взаимодействия излучения с веществом в методиках рентгеновской микроскопии и рентгеновской кристаллографии. Атомные факторы рассеяния.</i>
		<i>Связь атомных факторов рассеяния и показателя преломления вещества в рентгеновском диапазоне.</i>
	6.2. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом: рассеяние связанными электронами	<i>Рассеяние рентгеновского излучения связанным электроном. Резонансные поправки к атомным факторам рассеяния. Использование резонансной (аномальной) дифракции в исследования вещества.</i>
		<i>Связь резонансного рассеяния и мнимой части комплексного показателя преломления в рентгеновском диапазоне.</i>

Таблица 3.3.8.1. Структура и содержание курса.

Лаборатория за время реализации проекта активно участвует в подготовке мероприятий олимпиады и образовательного форума Всероссийской олимпиады студентов «Я – профессионал» по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса «мегасайенс».

Всероссийская олимпиада студентов «Я – профессионал» проводится для студентов бакалавриата, магистратуры, специалитета российских вузов и направлена на проверку теоретических знаний и прикладных компетенций. Главная цель проекта – поддержка талантливых

студентов, которая позволит им продолжить обучение в ведущем российском вузе или начать карьеру.

«Я – профессионал» – один из флагманских проектов президентской платформы «Россия – страна возможностей». Проект реализуется при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Олимпиада «Я – профессионал» проводится с 2017 года, в 2023/2024 учебном году проходит VII сезон.

73 предметных направления олимпиады объединены в 10 тематических групп:

- Естественные науки,
- Инженерные науки и технологии,
- Компьютерные науки,
- Педагогические науки,
- Искусство и гуманитарные науки,
- Медицина и здравоохранение,
- Социально-экономические науки,
- Агропромышленный комплекс и пищевые технологии,
- Вооружение и военная техника;
- Физическая культура.

МФТИ входит в число учредителей – членов Ассоциации организаторов студенческих олимпиад «Я – профессионал» наряду с другими лидирующими вузами (НИУ ВШЭ, Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, УрФУ, Университет ИТМО, СПбПУ Петра Великого, ТюмГУ, НИЯУ МИФИ и РАНХиГС) и крупными объединениями и компаниями: Общероссийское объединение работодателей «Российский союз промышленников и предпринимателей», Сбербанк России, Трубная Металлургическая Компания, Банк ВТБ, Госкорпорация «Росатом».

Всего в организацию и проведение олимпиады в 2023/2024 учебном году вовлечены 35 вузов и более 500 российских компаний.

Для организации и проведения направлений олимпиады «Я – профессионал» Ассоциация организаторов студенческих олимпиад «Я – профессионал» проводит ежегодный конкурсный отбор вузов. 39 российских вузов направили заявки на организацию и проведение направлений олимпиады в 2023/2024 учебном году.

В 2023 году по итогам конкурсного отбора были определены 35 вузов, включая МФТИ, для организации и проведения направлений олимпиады «Я – профессионал». МФТИ получил право на проведение олимпиады по 4 направлениям:

- Физика;
- Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”;
- Математика;
- Искусственный интеллект.

Направление «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» было включено в перечень направлений олимпиады «Я – профессионал» в 2020 году по инициативе МФТИ и при поддержке работодателей, заинтересованных в будущих научных кадрах, – ОИЯИ и ФИАН.

В 2023/2024 учебном году МФТИ организует и проводит олимпиаду по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» с поддержкой ОИЯИ, ФИАН, ТРИНИТИ, НИЦ КИ – ИФВЭ, НИЦ КИ, ИК СО РАН и при участии вуза-соорганизатора НГУ.

После отборочного этапа олимпиады по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”», прошедшего в конце 2022 года, в котором участвовали 403 студента, в марте 2023 года состоялся заключительный этап олимпиады. Для участия в заключительном этапе были приглашены студенты категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет», показавшие лучшие результаты в отборочном этапе.

В заключительном этапе участвовали 72 студента из вузов Москвы, Санкт-Петербурга, Томска, Новосибирска, Петропавловска-Камчатского, Воронежа, Ростова-на-Дону, Казани, Перми, Снежинска Челябинской области.

Для категории участия «бакалавриат» задания заключительного этапа состояли в письменном решении задач. Для категории участия «магистратура/специалитет» задания заключительного этапа состояли из двух частей: письменного решения задач и устного выступления с докладом.

Для проведения заключительного этапа олимпиады сотрудниками МФТИ, НГУ, ФИАН, НИЦ КИ – ИФВЭ, ОИЯИ и ТРИНИТИ были разработаны задания заключительного этапа по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» для категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет». Для подготовки студентов к заключительному этапу были разработаны демонстрационные версии заданий каждой категории участия.

Решение заданий заключительного этапа по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» состоялось дистанционно. На решение заданий было отведено 4 часа, для наблюдения за работой участников использовалась система прокторинга МФТИ. Для выступлений с докладами участников категории «магистратура/специалитет» использовалась система видеосвязи. Доклады были заслушаны комиссией, состоящей из научных сотрудников МФТИ, ФИАН, НИЦ КИ – ИФВЭ, ТРИНИТИ, ОИЯИ.

По итогам заключительного этапа были определены дипломанты направления «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» в категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет». Дипломы призеров, победителей и медалистов направления «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» получили 22 студента из НГУ, МИФИ, МФТИ, СПбГУ и ИТМО. Для каждой категории дипломантов предусмотрены льготы при поступлении в магистратуру и аспирантуру, возможность получить стажировку/работу в научной организации.

В следующем сезоне, по итогам регистрации, состоявшейся в период с 27 сентября по 14 ноября 2023 года, для участия в направлении «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» зарегистрировались 5011 студентов из 762 вузов, расположенных в 84 регионах России и за рубежом. Количество регистраций в 2023 году превысило аналогичный показатель 2022 года на 64%, что опережает среднее значение (38%) для VII сезона олимпиады «Я – профессионал».

77% зарегистрировавшихся студентов – 3854 – студенты бакалавриата. 1157 зарегистрировавшихся участников учатся в магистратуре или специалитете.

Наибольшую заинтересованность при регистрации на направление проявили студенты МФТИ – 239 студентов, НИЯУ МИФИ – 158 студентов, НИУ МЭИ – 102 студента, МГУ – 83 студента, ИТМО – 65 студентов, МГТУ им. Н.Э. Баумана – 64 студента, СПбПУ – 60 студентов, НИУ ВШЭ – 51 студент, МИСиС – 48 студентов, УрФУ – 40 студентов.

Для проведения отборочного этапа сотрудниками МФТИ и НИЦ КИ – ИФВЭ были разработаны задания отборочного этапа по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» для категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет».

Обновлена страница направления на сайте МФТИ: <https://lpr.mipt.ru/megascience> и продолжает работу телеграм-канал, публикующий актуальную и оперативную информацию для участников направления: <https://t.me/megascienceyaprofessional>.

Отборочный этап по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» проходит с 17 ноября до 3 декабря 2023 года. В течение этого периода участники могут выбрать день и время для того, чтобы приступить к решению задач. На решение отведено 8 часов. Отборочный этап проходит дистанционно с использованием онлайн-платформы Яндекс.Контест.

Итоги отборочного этапа будут подведены в конце декабря 2023 года – начале января 2024 года.

После подведения итогов отборочного этапа студенты, набравшие достаточно баллов в отборочном этапе, будут приглашены на заключительный этап, который состоится весной 2024 года. Заключительный этап олимпиады проводится очно или дистанционно с использованием технологий контроля поведения участников (прокторинг).

Для проведения заключительного этапа по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» сотрудниками МФТИ и организаций-партнеров будут разработаны задания для категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет». Для подготовки студентов к заключительному этапу будет организован и проведен образовательный вебинар.

Студентам категории «бакалавриат» на заключительном этапе предстоит решить более сложные задачи, чем задачи отборочного этапа. Студентов категории «магистратура/специалитет» на заключительном этапе ожидают два испытания: решение задач, а также подготовка научного доклада и выступление с ним перед жюри направления.

Весной 2024 года состоится проверка работ участников заключительного этапа, включающая рассмотрение апелляций. Итоги олимпиады будут подведены в мае 2024 года.

Участники направления приглашаются на образовательный форум олимпиады «Я – профессионал», который ежегодно проводит МФТИ. Форум включает значительную часть мероприятий (лекций, экскурсий, др.), посвященных физике нейтронов и синхротронного излучения и их применения, физике элементарных частиц, физике плазмы и управляемого термоядерного синтеза и других областей направления «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”».

В апреле 2023 года в МФТИ состоялся Образовательный форум олимпиады «Я – профессионал».

На форум были приглашены студенты – участники направлений: «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» и «Физика», «Искусственный интеллект» и «Математика», олимпиаду по которым проводит МФТИ, и направлений естественно-научной и технической тематики, олимпиаду по которым проводят другие вузы – участники «Я – профессионал». В форуме участвовали более 200 студентов из 67 вузов, расположенных в 32 субъектах РФ.

Форум был проведен по двум секциям: секция для студентов, интересующихся современной физикой и перспективными мегасайенс-установками, и секция для студентов, интересующихся методами и технологиями искусственного интеллекта и приложениями математики. В рамках первой секции с лекциями выступили ученые НИЦ «Курчатовский институт» и ТРИНИТИ, для студентов были организованы экскурсии в НИЦ «Курчатовский институт», НИЦ КИ – ИФВЭ, ТРИНИТИ, ОИЯИ и ИЯИ РАН.

В рамках форума традиционно состоялись мероприятия, вошедшие в программу форумов МФТИ по инициативе ЛФИ МФТИ в 2022 году:

- Научный джем – неформальная встреча студентов и научных сотрудников. Студенты смогли свободно и откровенно поговорить с 19 научными сотрудниками, получить ответы на свои вопросы. В Научном джеме приняли активное участие сотрудники лаборатории перспективных технологий мегасайенс, а также ведущие ученые МФТИ, ОИЯИ, институтов РАН и других научных организаций и центров.
- ФизХакатон – командное соревнование студентов в решении физических задач, предполагающее теоретическую и экспериментальную части, презентацию решений задач, их защиту и оппонирование. Мероприятие методически и организационно поддержано кафедрой общей физики МФТИ.

Всероссийская олимпиада студентов «Я – профессионал» по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» позволяет студентам, заинтересованным в дальнейшей научной карьере, продолжить образование в МФТИ, НГУ и других вузах РФ, развивающих тематику исследований на установках «мегасайенс», и начать работу в составе научных коллективов таких организаций как ОИЯИ, ФИАН, ТРИНИТИ, НИЦ КИ, ИК СО РАН, ИЯИ РАН и др., а также в лабораториях МФТИ, НГУ и других университетов. Задания

олимпиады, составленные научными сотрудниками, дают возможность студентам познакомиться с актуальными исследовательскими проблемами и попробовать свои силы в решении не учебных, а реальных задач. Мероприятия образовательного форума в МФТИ развивают общий кругозор студентов в области их будущих возможностей, знакомят с работой российских установок класса «мегасайенс», с учеными и научными коллективами, их профессиональной деятельностью, текущими проектами и разработками, а также помогают развить навыки интеллектуального сотрудничества и командной исследовательской работы, необходимые для будущей карьеры ученого.

Всероссийская олимпиада студентов «Я – профессионал» по направлению Направление «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» позволяет студентам, заинтересованным в дальнейшей научной карьере, продолжить образование в МФТИ, НГУ и других вузах РФ, развивающих тематику исследований на установках «мегасайенс», начать работу в составе научных коллективов таких организаций как ОИЯИ, ФИАН, ТРИНИТИ, НИЦ КИ, ИК СО РАН, ИЯИ РАН и др., а также в лабораториях МФТИ, НГУ и других университетов. Задания олимпиады, составленные научными сотрудниками, дают возможность студентам познакомиться с актуальными исследовательскими проблемами и попробовать свои силы в решении не учебных, а реальных задач. Мероприятия форума развивают общий кругозор студентов в области их будущих возможностей, знакомят с работой российских установок класса «мегасайенс», с коллективами ученых, их профессиональной деятельностью, текущими проектами и разработками.

Во всех мероприятиях олимпиады и образовательного форума сотрудники лаборатории принимали активное участие, включая работу в составе организационного комитета.

Сотрудниками лаборатории перспективных технологий мегасайенс 28-29 августа 2023 года проведена научная конференция-семинар "Использование новых методов обработки данных физического эксперимента. Применение методов машинного обучения на комплексе NICA".

Это первый семинар для специалистов, аспирантов и студентов ведущих российских институтов, заинтересованных в применении новых методов получения, процессинга и обработки данных физических экспериментов класса МЕГА. Современные физические эксперименты, в особенности по фундаментальным исследованиям на больших установках, предоставляют все возрастающий объем данных и требуют все возрастающих компьютерных мощностей для обработки результатов. Поэтому, все чаще для работы на современных экспериментах начинают использоваться новые методы работы с данными, в том числе на основе методов машинного обучения.

Семинар направлен на обсуждение новых методов обработки данных современного физического эксперимента, выявление основных проблем, требующих решения и выработку дальнейшей стратегии. Будет рассмотрен опыт различных групп по внедрению методов ММО и ИИ на разных этапах обработки экспериментальных данных, а также мониторинга параметров детекторов и ускорительного комплекса во время набора данных.

Основные научные темы мероприятия включали:

- 1) Новые методы набора данных физического эксперимента, в том числе использование новых методик быстрого он-лайн триггера
- 2) Методы машинного обучения для анализа данных экспериментов на комплексе NICA
- 3) Опыт использования ИИ в подготовке к анализу данных
- 4) Опыт использования распределенных и грид технологий в анализе данных экспериментов Большого адронного коллайдера и перспективы для проекта NICA
- 5) Обработка отклика детекторов и построение треков частиц в детекторах с использованием методов машинного обучения

В мероприятии приняли участие 67 представителей научных организаций, включая значительную долю молодых участников из числа обучающихся университетов. Полученный опыт в 2024 году получит развитие в формате молодежной научной школы «Машинное обучение в анализе данных физических экспериментов класса мегасайенс», которую планируется провести на базе МФТИ.

В рамках направлений научных тематик лаборатории выполняются научно-исследовательские работы обучающихся по следующим темам:

- Моделирование отклика сцинтилляторов различной природы в пакете Geant4
- Времяразрешенное исследование мембранных белков на рентгеновском синхротронном источнике четвертого поколения
- Определение геометрии столкновений тяжелых ионов передними адронными калориметрами в экспериментах на ускорительном комплексе НИКА
- Поиск эффективного сцинтиллятора для регистрации быстрых нейтронов
- Разработка считывающей электроники для передних детекторов в ядро-ядерных экспериментах с фиксированной мишенью
- Детектор АСТРА Фурье-дифрактометра ФСД на импульсном реакторе ИБР-2
- Фазовые и структурные изменения в липидных системах различного морфологического состояния.
- Разработка прототипа сцинтилляционного детектора для мюнографии в скважинах
- Разработка систем управления и сохранения поляризации протонов и дейтронов в проекте "Новый Нуклотрон"

По результатам проделанной работы предоставляется отчет обучающихся о НИР, заверенный научным руководителем или руководителем образовательной программы.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Отчеты обучающихся о НИР. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.8. Отчеты обучающихся о НИР.pdf](#)

3.3.9 Реализация в 2023 г. для подготовки специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня:

Модуль 6 «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров»;

Модуль 7 «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды»;

Модуль 8 «Радиационная безопасность».
(совместно с университетом «Дубна»).

Приказом № 2013к от 26 июня 2023 года (см. приложение) организован курс повышения квалификации с 17.07.2023 по 25.10.2023 по дополнительной профессиональной программе «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров» в объеме 72 часа (см. приложение), утверждено расписание занятий, и зачислены 23 слушателя на места, финансируемые за счет средств гранта в форме субсидии.

Целью реализации программы является – формирование знаний, умений и навыков, необходимых для ведения нового вида профессиональной деятельности в сфере фундаментального и прикладного материаловедения.

Программа знакомит слушателей с основами теории и практики исследования вещества методами малоуглового рентгеновского и нейтронного рассеяния. В процессе обучения слушатели должны усвоить основной математический аппарат методов интерпретации данных малоуглового рассеяния, ознакомиться с возможностями и ограничениями методов и, на примере анализа реальных экспериментальных данных, изучить основные приемы исследования строения вещества на надатомном уровне.

Содержание дополнительной профессиональной программы «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных

полимеров» и виды учебной деятельности разработаны в соответствии областям знаний и видам деятельности по направлениям реализации Федеральной программы, в частности, в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, области проведения синхротронных и нейтронных исследований. Результатом освоения программы является приобретение новых профессиональных компетенций в соответствии с профессиональным стандартом 24.078 «Специалист-исследователь в области ядерно-энергетических технологий», утвержден приказом Минтруда России от «16» марта 2018 г. №149н:

- ПК.1 Готовность применять в профессиональной деятельности углубленные знания о составе, строении и свойствах объектов (соединений, материалов) разной природы,
- ПК.2 Способность выбирать комплекс методов (методик), необходимых и достаточных для решения фундаментальных и прикладных задач в области химии и материаловедения, проводить эксперименты с обработкой и расчетом данных,
- ПК.3 Определять общую концепцию методологии исследования конденсированных сред, разрабатывать тактику и стратегию эксперимента с применением разных источников излучения.

Авторский коллектив дополнительной профессиональной программы «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров»:

- Волков Владимир Владимирович – гл. науч. сотрудник Института кристаллографии им. А.В. Шубникова, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, д-р хим. наук;
- Давыдов Евгений Александрович, доц. кафедры фундаментальных проблем физики микромира, канд. физ.-мат. наук.

Объем программы 72 часа, из них аудиторных - 70 часа (36 лекции, 26 часов практические занятия) 8 часов - самостоятельная работа, 2 часа – итоговая аттестация. Программа и входящие в нее виды учебной деятельности реализована Соисполнителем самостоятельно, в том числе с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения. Для осуществления образовательного процесса использованы программно-аппаратные комплексы общего назначения (операционная система (операционные системы), офисные приложения, средства обеспечения информационной безопасности, архиваторы, программы для работы с графическими, видео- и аудиофайлами). Формирование электронной информационно-образовательной среды осуществлено с помощью программной системы дистанционного обучения Moodle (lms.uni-dubna.ru).

Образовательная программа содержит 8 разделов (тем) для последовательного освоения обучающимися:

Введение. Место малоуглового рентгеновского и нейтронного рассеяния среди других методов исследования строения вещества на надатомном уровне. Основные преимущества и ограничения метода. Направления развития метода.

1. Основные принципы малоуглового рассеяния.

Рассеяние плоской волны веществом. Преобразование Фурье, свертка функций. Характеристическая функция. Рассеяние рентгеновских лучей на атомах. Рассеяние тепловых нейтронов на ядрах. Рассеяние на неупорядоченных структурах, растворы частиц. Понятие контраста. Влияние концентрации на интенсивность рассеяния. Изолированная однородная частица. Формула Дебая. Корреляционная функция. Интенсивность рассеяния монодисперсной системой на больших углах, инвариант Порода. Рассеяние сферическими частицами, сильно вытянутые частицы, сплюснутые частицы. Прямые и обратные задачи в структурном анализе. Ограничения в малоугловых структурных методах.

2. Определения интегральных параметров частиц.

Структурные параметры, определяемые из кривой интенсивности малоуглового рассеяния. Полная длина рассеяния, интенсивность рассеяния в направлении первичного пучка. Радиус инерции однородной частицы. Инварианты. Корреляционная длина и максимальный размер частицы. Методы расчета геометрических и весовых параметров частиц. Точность расчета радиуса инерции. График Гинье и метод Глаттера. Определение молекулярной массы частиц, техника

проведения абсолютных измерений в малоугловом эксперименте. Определение максимального размера частиц. Влияние неоднородностей плотности частиц на кривую рассеяния.

3. Прямые методы определения структуры.

Задача восстановления трехмерной функции плотности по одномерной кривой малоуглового рассеяния, неоднозначность ее решения. Методы моделей. Рассеяния простыми телами. Методы моделирования структуры. Параметризация функции формы частицы. Использование системы ортогональных сферических волновых функций для параметризации, основные преимущества такого подхода. Информативность малоугловых данных, проблема однозначности восстановления функции формы по кривой рассеяния. Примеры восстановления формы по модельным и реальным данным. Учет типичных неоднородностей плотности внутри частицы. Использование вариации контраста для увеличения информативности малоугловых данных на примере изучения строения биополимеров в нативном состоянии.

4. Исследование строения полидисперсных систем.

Интенсивность рассеяния полидисперсной системой. Методы расчета распределения по размерам. Аналитические методы. Параметризация функции распределения по размерам. Функции распределения по размерам для частиц известной формы. Методы моделей. Учет априорной информации об объекте: вид распределения по размерам, тип форм-факторов и анизотропия. Анализ полидисперсности через корреляционную функцию.

5. Основы метода малоуглового рассеяния.

Основные узлы и особенности экспериментальных малоугловых лабораторных установок и синхротронных станций. Теоретические основы структурной диагностики безчастичных, полидисперсных и монодисперсных наносистем. Методы исследования монодисперсных систем. Структурные инварианты: радиус инерции, максимальный размер и объем наночастиц. Инвариант Порода. График Кратки. Определение трехмерной формы частицы по данным МУРР, анализ устойчивости решения. Определение формы частиц для комплексов белок-ДНК. Расчет интенсивности малоуглового рассеяния от атомных моделей биомолекул. Построение четвертичной структуры многодоменного белка и/или белкового комплекса. Дистраивание неизвестных фрагментов макромолекул. Оценивание числа компонентов и олигомерного состава. Анализ подвижности макромолекул в растворе.

6. Методы исследования полидисперсных систем.

Определение функции распределения частиц по размерам. Сравнение алгоритмов и анализ устойчивости решения. Разделение компонентов смесей частиц разных размеров по данным гель-хроматографии в сочетании с МУР.

Подготовка презентации на тему «Применение синхротронного излучения (или нейтронов) для изучения объектов в конкретной области практической деятельности методом малоуглового рентгеновского рассеяния».

7. Особенности метода малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН).

Постановка задачи и предмет исследования. Особенности метода МУРН: вариация контраста, малоугловое рассеяние на магнитных неоднородностях, метод базисных функций, концентрированные системы, полидисперсные системы. Спектрометры малоуглового рассеяния: спектрометр МУРН на стационарном источнике, спектрометр МУРН на импульсном источнике нейтронов.

8. Методы обработки экспериментальных данных МУРН.

Задачи, решаемые на спектрометрах МУРН. Сравнительный анализ различных типов нейтронных источников. Сравнительный анализ различных схем малоугловых установок на нейтронных источниках. Метод изотопного замещения.

По итогам обучения слушатели, успешно выполнившие все требования образовательной программы и прошедшие итоговую аттестацию (ведомость итоговой аттестации в прикрепленном приложении), отчислены приказом от 25.10.2023 г. №3335к (см. приложение) с последующей выдачей удостоверений о повышении квалификации установленного образца (см. приложение).

Реализация образовательной программы: Модуль 7 «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды»

Приказом № 1904к от 19 июня 2023 года (см. приложение) организован курс повышения квалификации с 10.07.2023 по 15.11.2023 по дополнительной профессиональной программе «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды» в объеме 72 часа (см. приложение), утверждено расписание занятий, и зачислены 12 слушателей на места, финансируемые за счет средств гранта в форме субсидии.

Целью реализации программы является – освоение ядерно-физических методов обнаружения и определения содержания элементов в различных природных и техногенных материалах и объектах окружающей среды, в рамках решения производственных задач.

Содержание дополнительной профессиональной программы «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды» и виды учебной деятельности разработаны в соответствии областям знаний и видам деятельности по направлениям реализации Федеральной программы, в частности, в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, области проведения синхротронных и нейтронных исследований. Результатом освоения программы является приобретение новых профессиональных компетенций в соответствии с профессиональным стандартом 24.078 «Специалист-исследователь в области ядерно-энергетических технологий», утвержден приказом Минтруда России от «16» марта 2018 г. №149н [1]:

- ПК.1 Подготовка исходных данных, наладка экспериментальных стендов и установок для обеспечения выполнения научных исследований,
- ПК.2 Проведение расчетных исследований и измерений физических характеристик на экспериментальных стендах и установках,
- ПК.3 Обработка и анализ результатов расчетных исследований и экспериментальных измерений и составление отчетов по выполненным этапам работ.

Авторский коллектив дополнительной профессиональной программы «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды»:

- Каманина Инна Здиславовна – доцент кафедры экологии и наук о Земле, канд. биол. наук, доцент;
- Бадави Ваель Махмуд – ст. науч. сотр. Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, канд. биол. наук;
- Гроздов Дмитрий Сергеевич – начальник группы Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук.

Объем программы 72 часа, из них аудиторных - 64 часа (22 лекции, 42 часа практические занятия), 6 часов – самостоятельная работа, 2 часа – итоговая аттестация. Программа и входящие в нее виды учебной деятельности реализована Соисполнителем самостоятельно, в том числе с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения.

Для проведения лекционных занятий требуется специализированная аудитория, оснащенная компьютером, проектором, электронной доской.

Для проведения семинарских занятий требуется специализированный компьютерный класс, подключенный к сети Интернет и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду организации и к локальной сети университета, обеспечивающие доступ к инструментальным средствам и информации для проведения семинарских занятий.

Для проведения практических занятий слушатели направляются в специализированные лаборатории ЛНФ ОИЯИ, оснащенные необходимым оборудованием, а также на установку РЕГАТА на реакторе ИБР-2. Пневмотранспортная установка (ПТУ) РЕГАТА ИЯУ ИБР-2 предназначена для определения элементного состава исследуемых образцов используя метод нейтронного активационного анализа.

При применении дистанционных образовательных технологий, электронного обучения рабочее место педагогического работника и обучающегося должно быть оборудовано персональным компьютером и компьютерной периферией (веб-камерой, микрофоном, аудиоколонками и (или) наушниками).

В ходе изучения курса предусмотрено использование компьютера для выполнения измерений на специализированном программном обеспечении, поставленном в комплекте с приборами.

Для выполнения расчетных заданий предусмотрено использование офисного пакета МО, программа статистической обработки данных RStudio

Для подготовки презентаций – Power Point, Microsoft Office, информационно-библиотечная система MAPK SQL.

Для самостоятельной работы используются классы с доступом к ресурсу Интернет.

С целью соблюдения техники безопасности, а также повышения эффективности освоения навыков и умений и достижения планируемых результатов обучения практические занятия в лабораториях ЛНФ ОИЯИ и на установке РЕГАТА на реакторе ИБР-2 проводятся в малых группах по 5-6 человек.

Образовательная программа содержит 3 раздела с возможностью одновременного освоения обучающимися.

Раздел 1. Экологохимические исследования объектов окружающей среды.

1.1 Особенности химического состава объектов окружающей природной среды. Неравномерность распределения химических элементов в объектах природной среды. Геохимические аномалии: литохимические, гидрохимические, атмохимические и биогеохимические. Положительные и отрицательные биогеохимические аномалии. Техногенные геохимические аномалии;

1.2 Анализ почв. Контролируемые показатели химического состояния почв при почвенно-химическом мониторинге. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах. Формы соединений микроэлементов в почвах. Валовые, кислоторастворимые, подвижные (доступные) соединения микроэлементов и методы их определения. Методы очистки почв от загрязнения;

1.3 Анализ загрязнения атмосферного воздуха. Альтернативные методы анализа атмосферного воздуха. Анализ снежного покрова, как альтернативный метод измерения интегральных выпадений за зимний период;

1.4 Критерии оценки состояния объектов природной среды. Приоритетные контролируемые параметры природной среды;

1.5 Принципы оценки соответствия среды обитания человека оптимальным условиям его существования. Санитарно-гигиенические показатели. Предельно допустимые концентрации (ПДК) в воздушной среде, водной среде, почве. Эколого-геохимические показатели состояния окружающей среды (коэффициенты концентрации (Кс), суммарные показатели загрязнения (Zс)). «Эталоны» сравнения – кларки, фоновые концентрации;

1.6 Организация экологохимических исследований в лабораторных и природных условиях.

Раздел 2. Статистическая обработка геоэкологических данных.

2.1 Одномерный статистический анализ. Статистика. Данные. Типы анализа. Описательная статистика. Нормальное распределение. Прямоугольная диаграмма нормального распределения. Основные закономерности одномерного статистического анализа данных. Программа статистической обработки данных RStudio;

2.2 Двумерный статистический анализ. Основные закономерности двумерного статистического анализа данных. Диаграмма рассеяния. Корреляция. Коэффициент корреляции. Регрессия. Линейная регрессия. Полиномиальная регрессия;

2.3 Многомерный статистический анализ. Основные закономерности многомерного статистического анализа данных. Кластерный анализ. Исследовательский факторный анализ. Анализ основных компонентов. Собственные значения и собственные векторы;

2.4 Статистическая обработка экспериментальных данных. Статистический анализ экспериментальных геоэкологических данных в программе статистической обработки данных RStudio;

Раздел 3. Нейтронно-активационный анализ.

3.1 Введение в нейтронно-активационный анализ (НАА). Методы элементного анализа. Сравнение методов элементного анализа. Активация. Источники нейтронов. Распад. Измерение.

Вывод уравнения измерения. Затухание и измерение. Классификация НАА в соответствии с используемым химическим составом.;

3.2 Применение нейтронно- активационного анализа для решения задач экологии и материаловедения. Виды загрязнений окружающей среды. Пассивный биомониторинг. Активный биомониторинг. Мониторинг качества воды. Индексы опасности ТНQ и НI. Оценка загрязнения почвы и донных отложений. Биоремедиация почвы. Контроль качества и безопасности пищевых продуктов. Анализ лекарственных растений. Нанотоксикология. Разработка эксперимента. Культурное наследие. Челябинский метеорит;

3.3 Основы пробоподготовки для НАА. Схема процедур для НАА. Оборудование для пробоподготовки. Сушка. Гранулирование. Гомогенизация. Взвешивание;

3.4 Установка РЕГАТА на реакторе ИБР-2. Нейтронные приборы на реакторе ИБР-2. Реактор и радиоаналитический комплекс "РЕГАТА". РЕГАТА экспериментальной установки на реакторе ИБР-2;

3.5 Градуировка гамма-спектрометрического оборудования. Анализ образцов РТ (короткоживущих изотопов). Анализ образцов РТ (долгоживущих изотопов). Контейнеры для переупаковки образцов. Автоматизация гамма-спектрометрии;

3.6 Основы обработки гамма спектров. Методы, доступные в области нейтронно-активационного анализа и прикладных исследований. Атомно-эмиссионная спектроскопия и атомно-абсорбционная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой. Гамма-спектрометрия с низким уровнем фона и альфа-спектрометрия;

3.7 Методы анализа данных. Подходы к анализу данных НАА. Активный биомониторинг в Улан-Баторе. Оценка данных о биосорбции. Биосорбция (Zn).

По итогам обучения слушатели, успешно выполнившие все требования образовательной программы и прошедшие итоговую аттестацию (ведомость итоговой аттестации в прикрепленном приложении), отчислены приказом от 15.11.2023 г. №3617к (см. приложение) с последующей выдачей удостоверений о повышении квалификации установленного образца (см. приложение).

1.1.3 Реализация образовательной программы: Модуль 8 «Радиационная безопасность»

Приказом № 1888к от 16 июня 2023 года (см. приложение) организован курс повышения квалификации с 03.07.2023 по 22.11.2023 по дополнительной профессиональной программе «Радиационная безопасность» в объеме 72 часа (см. приложение), утверждено расписание занятий и зачислены 33 слушателя на места, финансируемые за счет средств гранта в форме субсидии.

Целью реализации программы является – осмысление и систематизация теоретической и практической подготовки по вопросам дозиметрии и физики защиты, ознакомление с дозиметрическими характеристиками полей ионизирующего излучения и их размерности; ознакомление с различными расчетными и экспериментальными методами определения дозы излучения в различных средах и особенно в тканях живого организма; формирование современного представления о радиационной безопасности и радиационном контроле; усвоение принципов работы при соблюдении норм радиационной безопасности.

Объектами профессиональной деятельности в рамках изучаемой дисциплины являются: радиационные характеристики источников, процессы взаимодействия излучения с веществом, защитные свойства различных веществ, методы расчета защиты и ее оптимизации.

Содержание дополнительной профессиональной программы «Радиационная безопасность» и виды учебной деятельности разработаны в соответствии областям знаний и видам деятельности по направлениям реализации Федеральной программы, в частности, в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, области проведения синхротронных и нейтронных исследований. Результатом освоения программы является приобретение новых профессиональных компетенций в соответствии с профессиональным стандартом профессиональным стандартом 24.020 Специалист по радиационному контролю атомной отрасли (утвержден приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 04.02.2021 № 41н):

– ПК.1 Способен использовать профессиональные знания для участия в проведении экспериментов по тематике исследований по заданной методике, составлять описание проводимых

исследований, осуществлять анализ и обработку экспериментальных данных,

– ПК.2 Способен обеспечивать инструментальные измерения радиационных характеристик, проведение комплекса работ по мониторингу экологической и радиационной безопасности.

Авторский коллектив дополнительной профессиональной программы «Радиационная безопасность»:

– Мокров Юрий Владимирович – доцент кафедры биофизики, канд. техн. наук, ОРБ ОИЯИ, начальник группы метрологии и индивидуального контроля;

– Бескровная Людмила Григорьевна – ст. преподаватель, научный сотрудник ЛРБ ОИЯИ, отдел радиационных исследований, сектор радиационных исследований на базовых установках.

Объем программы 72 часа, из них аудиторных - 72 часа (26 лекции, 44 часа практические занятия), 2 часа – итоговая аттестация. Программа и входящие в нее виды учебной деятельности реализована Соисполнителем самостоятельно, в том числе с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения. Для осуществления образовательного процесса использованы программно-аппаратные комплексы общего назначения (операционная система (операционные системы), офисные приложения, средства обеспечения информационной безопасности, архиваторы, программы для работы с графическими, видео- и аудиофайлами). Формирование электронной информационно-образовательной среды осуществлено с помощью программной системы дистанционного обучения Moodle (lms.uni-dubna.ru).

Образовательная программа содержит 3 раздела для последовательного освоения обучающимися и 7 лабораторных работ:

Раздел 1. Дозиметрия ионизирующих излучений

1.1 Дозиметрия для радиационной безопасности. Основные величины и единицы: флюенс, средняя переданная энергия, поглощенная доза, линейная передача энергии, линейная энергия, распределение поглощенной дозы по ЛПЭ, фактор качества в точке ткани, эквивалент дозы, амбиентный эквивалент дозы, эквивалент дозы направления, индивидуальный эквивалент дозы. Особенности зависимости эффектов воздействия на организм ионизирующих излучений от поглощенной дозы и необходимость введения новых величин. Детерминированные и стохастические величины. Величина нормируемая. Операционная величина;

1.2 Величины для контроля радиационной безопасности. Величины и единицы для измерений и расчетов. Распределение поглощенной дозы по линейной передаче энергии. Величины эквивалента дозы. Коэффициент качества излучения. Эквивалент дозы. Операционные величины. Амбиентный эквивалент дозы. Направленный эквивалент дозы. Индивидуальный эквивалент дозы. Величины, основанные на средних значениях и используемые для целей ограничения облучений. Средняя поглощенная доза в определенном органе или ткани человеческого тела. Эквивалентная доза в органе или ткани. Эффективная доза. Эквивалентная доза. Эффективная (эквивалентная) годовая доза. Эффективная коллективная доза. Доза предотвращенная. Риск радиационный;

1.3 Дозиметрический контроль. Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Методы индивидуального дозиметрического контроля (ИДК). Индивидуальный фотоконтроль. Индивидуальный дозиметрический контроль с помощью ТЛД. Дозиметрический контроль внутреннего профессионального облучения. Контроль радиационной обстановки. Измерение активности;

Раздел 2. Физика защиты

2.1 Радиационные характеристики источников ионизирующих излучений.

Классификация источников излучения. Флюенс от точечного источника. Радионуклиды как источники излучений. Радионуклиды как гамма-излучатели. Характеристики источников нейтронов. Источники нейтронов спонтанного деления. Источники нейтронов на основе ускорителей заряженных частиц. Источники нейтронов деления – наиболее мощные нейтронные источники;

2.2 Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом.

Взаимодействие фотонов с веществом. Основные закономерности взаимодействия нейтронов с ядрами. Пробег заряженных частиц;

2.3 Защита от ионизирующих излучений.

Классификация защит. Нейтроны $E > 80$ Эв. Нейтроны $E < 80$ Эв. Защита от фотонов;

2.4 Инженерные методы расчета защиты.

Радиационный контроль в окружающей среде, особенности методов измерений. Измерения радиоактивности проб почвы, воды, растительности и воздуха. Контроль радиоактивности на местности. Результаты дозиметрии в г. Дубна;

Раздел 3. Инструментальные методы радиационной безопасности

3.1 Радиационная безопасность и радиационный контроль.

Структура и инструментальные методы контроля радиационной обстановки. Система обеспечения радиационной безопасности. Основные цели и задачи контроля радиационной обстановки. Основные объекты и структура контроля радиационной обстановки. Классификация радиационных объектов по степени их потенциальной опасности;

3.2 Основные принципы построения приборов радиационной безопасности.

Инструментальные методы мониторинга радиационной обстановки. Технические средства контроля. Классификация приборов по виду ионизирующего излучения, по назначению по эксплуатации, по временному характеру контроля. Основные понятия и величины в радиационной защите и безопасности;

3.3 Дозиметры и радиометры.

Дозиметры фотонного излучения. Мощность амбиентного эквивалента дозы. Амбиентный эквивалент дозы. Дозиметрия на основе газоразрядных счетчиков. Дозиметры на основе сцинтилляционных детекторов. Дозиметры на основе ионизационной камеры.

Радиометры аэрозолей и газов. Методы и приборы для измерения объемной активности радона. Сцинтилляционный метод измерения радона. Полупроводниковый метод измерения радона. Электростатический метод измерения радона. Ионизационный метод измерения радона. Трековый метод измерения радона.

Дозиметры и радиометры нейтронного излучения. Носимые радиометры-дозиметры. Сцинтилляционные детекторы, покрытые $ZnS(Ag)$. Радиометры на основе сцинтилляторов. Радиометры на основе газоразрядных счетчиков.

Индивидуальные дозиметры фотонного и нейтронного излучений. Индивидуальный эквивалент дозы внешнего облучения. Механизм радиотермолюминесценции. Термолюминесцентные индивидуальные дозиметры. ТЛД на основе LiF .

Радиометры жидкости и проб окружающей среды. Радиационный контроль питьевой воды. Расчет дозы внутреннего облучения за счет радона. Способы и методы удаления радона из питьевой воды. Требования к методам и средствам радиационного контроля воды. Методы и приборы для измерения объемной активности радона;

3.4 Контроль радиоактивного загрязнения поверхностей.

Приборы контроля радиоактивного загрязнения. Спектрометрические приборы. Германиевые гамма спектрометрические приборы для оценки загрязненных материалов. Масс-спектрометрия. Счетчики излучения человека. Контроль, прогнозирование и учета дозовых нагрузок персонала АЭС и населения. Эффективная доза;

3.5 Системы радиационного контроля.

Система контроля внутреннего облучения. Дозиметрия эквивалентных доз кожи и хрусталика. Мощность максимальной потенциальной эквивалентной дозы в хрусталике глаза и коже.

Лабораторные работы

1. Ионизационные и сцинтилляционные дозиметры фотонного излучения.

В работе изучаются наиболее распространенные дозиметры фотонного излучения, которые работают на основе ионизационного и сцинтилляционного методов регистрации излучения. В данной работе внимание уделено инспекционным дозиметрам, т.е. дозиметрам, которые измеряют дозы облучения без присутствия в поле излучения человека. В процессе выполнения работы

слушатели изучают наиболее распространенные в практике радиационного контроля дозиметры фотонов по их Руководствам по эксплуатации, непосредственно работают с приборами по измерению доз фотонного излучения от радионуклидного источника цезия-137, расположенного в защитном контейнере. Результаты измерений обрабатываются в соответствии с концепцией неопределенности измерений. Проводится анализ показаний приборов различных типов и выясняются причины их различий (раздел 3.3).

2. Дозиметры нейтронов на основе детекторов тепловых нейтронов в водородсодержащих замедлителях.

В работе изучаются наиболее распространенные в практике радиационного контроля дозиметры нейтронов на основе водородсодержащих замедлителей. Работа таких дозиметров основана на замедлении падающих на дозиметр нейтронов широкого энергетического диапазона и последующей регистрации замедлившихся нейтронов датчиками тепловых нейтронов, расположенных внутри замедлителей. Дозиметры такого типа обладают рядом преимуществ в сравнении с дозиметрами других типов. В работе изучаются дозиметры двух типов: с одним замедлителем и с набором замедлителей. К первому относится дозиметр на основе борного счетчика в комбинированном замедлителе, который широко используется в радиационном контроле в ОИЯИ. К нему же относится ряд промышленных дозиметров, таких, как КДН-2 и ДН-А-1. Ко второму типу относится многошаровой дозиметр со сцинтилляционным детектором, в котором используется набор шаровых полиэтиленовых замедлителей разного диаметра.

В процессе выполнения работы слушатели изучают указанные выше дозиметры и проводят измерения доз излучения от радионуклидного Pu-Be источника нейтронов, расположенного в защитном контейнере (раздел 3.3).

3. Образцовый всеволновый счетчик нейтронов (радиометр) ОВС-3.

В работе изучается всеволновый счетчик нейтронов, то есть счетчик, который имеет постоянную чувствительность в широком диапазоне энергий нейтронов – от тепловых нейтронов до нейтронов с энергией до 14 МэВ. Объясняется принцип работы счетчика и особенности его конструкции, позволяющие ему иметь постоянную чувствительность в широком диапазоне энергий.

В процессе выполнения работы слушатели определяют с помощью ОВС-3М поток нейтронов от Pu-Be источника нейтронов, расположенного в защите из борированного полиэтилена. Сравняется полученное значение потока со значением, приведенным в свидетельстве о проверке источника. Объясняется причина различия этих значений (раздел 3.3).

4. Фотографические методы определения индивидуальных доз фотонного излучения.

Фотографический метод до недавних пор являлся одним из самых распространенных методов индивидуальной дозиметрии фотонов и применяется в настоящее время. Ему свойственны простота, универсальность, высокая чувствительность и документальность. В работе изучаются индивидуальные дозиметры ИФК-2,3, в которых используется фотографический метод с рентгеновской пленкой, и денситометры двух типов, которые служат для определения почернения пленок.

Слушатели измеряют на денситометре почернения облученных и проявленных пленок и с помощью построенных ранее градуировочных кривых определяют дозы облучения (раздел 3.3).

5. Индивидуальные дозиметры нейтронов на основе ядерных эмульсий.

Фотоэмульсионный метод дозиметрии нейтронов основан на использовании ядерной эмульсии типа МК-20 толщиной 20 микрон. Доза нейтронов определяется по числу треков в эмульсии, которые подсчитываются лаборантами с помощью микроскопа с увеличением до 1000 раз. Треки образуются в эмульсии протонами отдачи, которые возникают при взаимодействии нейтронов с ядрами азота и водорода, входящими в состав эмульсии. Использование данного метода дозиметрии нейтронов основано на использовании замедляющих свойств человеческого тела, на котором располагается дозиметр.

В процессе выполнения работы слушатели определяют с помощью микроскопа количество треков на траверсе длиной 15 мм эмульсии МК-20. По полученному числу треков определяется доза облучения сотрудника, использовавшего дозиметр с данной эмульсией. При этом используются результаты градуировки дозиметра на радионуклидном источнике нейтронов (раздел 3.3).

6. Комплекс индивидуального дозиметрического контроля АКЖДК-301.

Комплекс индивидуального дозиметрического контроля АКЖДК-301 является наиболее приемлемым отечественным промышленным комплексом ИДК. Он широко используется на многих российских предприятиях, таких, как атомные станции, НИИ и т.п. В этом комплексе используются термолюминесцентные детекторы (ТЛД) на основе фтористого лития, регистрирующие как нейтроны, так и фотоны. При этом для измерения доз нейтронов используются альбедные дозиметры, работа которых основана на регистрации замедлившихся в теле человека и вышедших из него нейтронов с помощью ТЛД, расположенных на поверхности тела.

При выполнении данной работы слушатели знакомятся с составом комплекса, с устройством индивидуального дозиметра ДВГН-01, входящего в состав комплекса. Каждый из них измеряет на считывателе СТЛ-100 с помощью дозиметра дозу облучения, которую он получил при выполнении работы на поверочной установке. После выполнения работы распечатывается протокол доз, полученных всеми слушателями (раздел 3.3).

7. Поверочные установки и поверка приборов радиационного контроля.

Все дозиметры, используемые в радиационном контроле, подлежат обязательной ежегодной поверке, в процессе которой определяется их пригодность к работе. Поверка дозиметров проводится на поверочных установках с использованием рабочих эталонов. В качестве рабочих эталонов применяются либо радионуклидные источники, либо дозиметры.

В процессе выполнения работы слушатели знакомятся с устройством и характеристиками двух поверочных установок, использующихся в ОИЯИ для поверки дозиметров.

Дозиметры фотонного излучения поверяются на поверочной установке типа УПГД. Основным элементом ее является коллимирующее устройство, в котором формируется коллимированный пучок фотонов, в котором располагаются поверяемые дозиметры.

Дозиметры нейтронов поверяются в условиях открытой геометрии с экранирующим конусом, который служит для учета вклада рассеянных в помещении нейтронов в показания дозиметров. В качестве рабочего эталона при этом используется дозиметр ДКС-96 с нейтронным датчиком.

В процессе проведения работы слушатели проводят поверку дозиметра фотонов ДРГ-01-Т1 в коллимированном пучке, создаваемым радионуклидным источником цезий-137. В результате они должны сделать заключение о пригодности прибора к работе (разделы 3.4, 3.5).

По итогам обучения слушатели, успешно выполнившие все требования образовательной программы и прошедшие итоговую аттестацию (ведомость итоговой аттестации в прикрепленном приложении), отчислены приказом от 22.11.2023 г. №3722к (см. приложение) с последующей выдачей удостоверений о повышении квалификации установленного образца (см. приложение).

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Образовательная программа Модуль 6 «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Раб программа Синхр и нейтр исследования для изучения БАВ синт и прир полимеров.pdf](#)
- Образовательная программа Модуль 7 «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Раб программа Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды.pdf](#)
- Образовательная программа Модуль 8 «Радиационная безопасность». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Раб программа Радиационная безопасность.pdf](#)
- Приказ № 2013к от 26.06.2023 о зачислении слушателей на обучение по образовательной программе «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Приказ о зачислении слушателей №2013к от 26.06.2023\(Синхр и нейтр исследования для изучения БАВ синт и прир полимеров\).pdf](#)

- Приказ № 1904к от 19.06.2023 о зачислении слушателей на обучение по образовательной программе «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Приказ о зачислении слушателей №1904к от 19.06.2023\(Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды\).pdf](#)
- Приказ № 1888к от 16.06.2023 о зачислении слушателей на обучение по образовательной программе «Радиационная безопасность». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Приказ о зачислении слушателей №1888к от 16.06.2023 \(Рад безопасность\).pdf](#)
- Приказ № 3335к от 25.10.2023 об отчислении слушателей с курса повышения квалификации «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Приказ об отчислении слушателей 3335к от 25.10.2023.pdf](#)
- Приказ № 3617к от 15.11.2023 об отчислении слушателей с курса повышения квалификации «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Приказ об отчислении слушателей 3617к от 15.11.2023.pdf](#)
- Приказ № 3722к от 22.11.2023 о зачислении слушателей на обучение по образовательной программе «Радиационная безопасность». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Приказ об отчислении слушателей 3722к от 22.11.2023.pdf](#)

3.3.10 Проведение в 2023 г. практической подготовки по образовательной программе «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» (совместно с университетом «Дубна»)

Приказом № 3108к от 09 октября 2023 года (см. приложение) организована практическая подготовка 09.10.2023 по 20.11.2023 по дополнительной профессиональной программе повышения квалификации «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» в объеме 72 часа (см. приложение), утверждено расписание занятий и зачислены 34 слушателя на места, финансируемые за счет средств гранта в форме субсидии.

Целью реализации программы является – изучение передового опыта, получение теоретических знаний, приобретение практических умений и навыков в области автоматизации, получения и обработки данных в экспериментах по изучению свойств конденсированных сред с использованием рассеяния нейтронов на уникальном оборудовании быстрого импульсного реактора ИБР-2.

Содержание дополнительной профессиональной программы «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» и виды учебной деятельности разработаны в соответствии областям знаний и видам деятельности по направлениям реализации Федеральной программы, в частности, в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, области проведения синхротронных и нейтронных исследований. Результатом освоения программы является приобретение новых профессиональных компетенций в соответствии с профессиональным стандартом профессиональным стандартом 24.078 «Специалист-исследователь в области ядерно-энергетических технологий», (утвержден приказом Минтруда России от «16» марта 2018 г. №149н)

- ПК.1 Подготовка исходных данных, наладка экспериментальных стендов и установок для обеспечения выполнения научных исследований,
- ПК.2 Проведение расчетных исследований и измерений физических характеристик на экспериментальных стендах и установках,
- ПК.3 Обработка и анализ результатов расчетных исследований и экспериментальных измерений и составление отчетов по выполненным этапам работ.

Авторский коллектив дополнительной профессиональной программы «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики»:

- Боднарчук Виктор Иванович – доцент кафедры ядерной физики, начальник отдела комплекса спектрометров ИБР-2, канд. физ.-мат. наук;

– Пискунова Оксана Ивановна – доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», директор Инженерно-физического института, канд. техн. наук;

– Давыдов Евгений Александрович – доцент кафедры фундаментальных проблем физики микромира, канд. физ.-мат. наук.

Объем программы 72 часа, из них аудиторных - 64 часа (20 лекции, 44 часа практические занятия), 6 часов – самостоятельная работа, 2 часа – итоговая аттестация. Программа и входящие в нее виды учебной деятельности реализована Соисполнителем самостоятельно, в том числе с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения.

Для проведения лекционных занятий требуется специализированная аудитория, оснащенная компьютером, проектором, электронной доской.

Для проведения практических занятий слушатели направляются в специализированные лаборатории ЛНФ ОИЯИ, оснащенные необходимым оборудованием, а также на реактор ИБР-2. ИБР-2 (IBR-2) – быстрый импульсный реактор с механической модуляцией реактивности подвижными отражателями. Реактор ИБР-2 является самым высокопоточным в мире импульсным источником. Включен в европейскую сеть ведущих нейтронных центров.

Для выполнения расчетных заданий предусмотрено использование офисного пакета МО. Для подготовки презентаций – Power Point, Microsoft Office, информационно-библиотечная система MARK SQL. Для самостоятельной работы используются классы с доступом к ресурсу Интернет.

С целью соблюдения техники безопасности, а также повышения эффективности освоения навыков и умений и достижения планируемых результатов обучения практические занятия в лабораториях ЛНФ ОИЯИ и на реакторе ИБР-2 проводятся в малых группах по 5-6 человек.

Образовательная программа содержит 5 разделов с возможностью одновременного освоения обучающимися.

Раздел 1. Вакуумная техника в нейтронном эксперименте

1.1. Системы вакуумирования нейтроноводов

Основные элементы используемые в построении вакуумных линий, их виды и назначение. Способы монтажа и соединения вакуумных линий. Виды уплотнений вакуумных соединений. Виды и типы вакуумной арматуры, ее назначение и применение, основные эксплуатационные характеристики. Виды и типов современных вакуумных насосов, принципы работы, устройство, особенности применения. Типы вакуумных клапанов и задвижек, особенности их конструкций, их возможности в автоматизации вакуумирования нейтроноводов. Обозначение элементов вакуумной системы на схемах и чертежах. Примеры схем вакуумных систем;

1.2. Датчики вакуума MKS925

Обзор основных типов вакуумных датчиков. Принцип работы датчика Пирани. Единицы измерения давления и их соотношения, практика в пересчете значений вакуума. Устройство датчика MKS925 на основе микроэлектромеханической системы. Цифровой и аналоговый режимы работы датчика, их отличия и особенности использования. Протоколы обмена данными RS232 и RS485 их особенности, сильные и слабые стороны, направления применения. Модуль преобразования интерфейса RS485 в USB ОВЕН АС4. Терминальная программа NuperTerminal для отправки команд управления на датчик, основные настройки параметров обмена данными по СОМ-порту. Синтаксис команд управления датчиком. Составление запросов к датчику и разбор полученных ответов;

1.3. Автоматизация управления вакуумом

Электромагнитные клапана их устройство типы и характеристики. Варианты исполнения и применения. Электромагнитный клапан XLS-25, варианты его исполнения и управления переменным или постоянным напряжением. Понятие тока открытия и тока удержания. Принцип работы твердотельных реле. Понятие «управляющего напряжения». Линейка релейных блоков управления ОВЕН МК и их основные параметры. Выбор оптимального варианта для задачи управления системой откачки нейтроновода. Программа конфигуратор ОВЕН, настройки связи ПК с релейным блоком через СОМ-порт по интерфейсу RS485.

Раздел 2. Программное обеспечение нейтронных спектрометров

2.1 Современные тенденции и архитектуры систем управления экспериментом

Современные тенденции и архитектуры систем управления, системы EPICS и Tango. Основные форматы экспериментальных данных и наиболее популярные программы для их обработки. Система Sonix+, принятая на установки и ее особенности. Язык программирования Python и его применение в системах управления экспериментом;

2.2 Программное обеспечение спектрометров

Принципы организации и основные черты (ядро, пользовательский интерфейс и т.д.). Роль стандартизации и унификации. Наиболее популярные подходы EPICS и Tango. Основные виды и форматы данных (Nexus), платформы для программ обработки (Mantid);

2.3 Система Sonix+

Основные черты системы и состав. Универсальный графический интерфейс пользователя. Системы Журнал, WebSonix и центральное хранилище данных;

2.4 Язык Python

Особенности языка и его применение в системах управления спектрометрами. Способы работы на языке (IDE, notebook, web/cloud). Типы данных, индексы, списки и циклы. Классы: объекты, атрибуты, методы. Модули и пакеты для работы с данными и их визуализации (numpy, scipy, matplotlib). Примеры практических задач по обработке данных и визуализации результатов.

Раздел 3. Моделирование нейтронных установок

3.1. Методы моделирования нейтронных установок

Метод Монте-Карло. Генератор случайных чисел. Оптические системы для нейтронных пучков. Фокусирующие и изогнутые нейтронотводы. Прерыватели нейтронного пучка. Импульсные и постоянные источники нейтронов. Нейтронная рефлектометрия. Оптимизация параметров нейтронной установки;

3.2. Инструмент для моделирования нейтронных установок

Программа моделирования нейтронных установок VITESS. Примеры результатов моделирования.

Раздел 4. Автоматизированные системы управления оборудованием нейтронного эксперимента

4.1. Механизмы перемещения и позиционирования

Механизмы перемещения и позиционирования. Определение оптимальных параметров движения исполнительных механизмов. Устройства регулирования температуры образца. Управление механическими системами;

4.2. Электроника управления и программное обеспечение для работы с устройствами позиционирования

Свойства и характеристики механизмов перемещения образцов. Электроника и исполнительные механизмы, отвечающие за позиционирование образцов в зоне вывода пучка нейтронов на спектрометрах реактора;

4.3. Методы регулирования температуры на образце

Основные принципы ПИД регулирования, принципы нахождения ПИД коэффициентов экспериментальным путем;

4.4. Системы управления фоновыми прерывателями

Свойства и характеристики механических систем, пропускающих на образец нейтроны в строго определенное время, синхронизация момента ввода окна диска фонового прерывателя в область нейтронного пучка с моментом пролета нейтронов определенной энергии, системы управления Фурье-прерывателями.

Раздел 5. Методы термостатирования в нейтронном эксперименте

5.1. Криостаты

Азотные температуры. Гелиевые температуры. Специальные методы получения низких температур в области (300-77)К, (77-4.2)К, (4.2-0.1)К, (3-0.3)К, (0.7-0.05)К для применения в физическом эксперименте, нейтронном эксперименте;

5.2. Криокуллеры

Криокуллеры замкнутого цикла. Безжидкостные технологии получения низких температур. Криостаты на основе криокуллеров замкнутого цикла. Контроллеры температур. Получение высоких

магнитных полей с использованием ВТСП. Криостат с магнитом на основе ВТСП. Измерение магнитного поля, создаваемого сверхпроводящим магнитом;

5.3. Проведение низкотемпературного эксперимента

Этапы работы с криостатом. Охлаждение. Измерение магнитного поля.

Итоговая аттестация по программе «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» предусматривает подготовку и защиту итогового письменного отчета по практической подготовке, подтверждаемого оценкой «отлично», «хорошо» или «удовлетворительно».

Отчет по практической подготовке оформляется в соответствии с установленными правилами и должен отражать в письменном виде результаты прохождения практической подготовки в соответствии с индивидуальным заданием. Отчет по практической подготовке должен содержать: тему индивидуального задания, исходные данные к работе, выполнение этапов индивидуального задания, анализ темы исследования, описание результатов исследования (описание исследуемых установок, результаты моделирования, результаты анализа полученных данных и т.п.), заключение (вывод).

По итогам обучения слушатели, успешно выполнившие все требования образовательной программы и прошедшие итоговую аттестацию (ведомости итоговой аттестации в прикрепленном приложении), отчислены приказом от 20.11.2023 г. №3681к (см. приложение) с последующей выдачей удостоверений о повышении квалификации установленного образца (см. приложение).

Отчеты по практической подготовке по программе «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» представлены в прикрепленном приложении.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Приказ № 3108к от 09.10.2023 о зачислении слушателей на обучение по образовательной программе «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.10 Приказ о зачислении слушателей №3108к от 09.10.2023.pdf](#)
- Отчеты по практической подготовке по образовательной программе «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.10 Отчеты по практической подготовке.pdf](#)
- Приказ № 3681к от 20.11.2023 об отчислении с курса повышения квалификации «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.10 Приказ об отчислении слушателей 3681к от 20.11.2023.pdf](#)
- Программа практической подготовки. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.10 Программа практической подготовки.pdf](#)
- Списочный состав лиц, прошедших практическую подготовку. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.10 Списочный состав лиц, прошедших практическую подготовку.pdf](#)

3.3.11 Проведение итоговой аттестации по 4 курсам повышения квалификации (Модуль 6 «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров»),

Модуль 7 «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды»,

Модуль 8 «Радиационная безопасность»,

«Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики») с выдачей документов о повышении квалификации по каждому курсу.

(совместно с университетом «Дубна»).

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Копии удостоверений о повышении квалификации по курсу повышения квалификации «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.11 Копии удостоверений о ПК](#)

по курсу Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров.pdf

- Копии удостоверений о повышении квалификации по курсу повышения квалификации «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды». ФАЙЛ: *Прил. ПГ 3.3.11 Копии удостоверений о ПК по курсу Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды.pdf*
- Копии удостоверений о повышении квалификации по курсу повышения квалификации «Радиационная безопасность». ФАЙЛ: *Прил. ПГ 3.3.11 Копии удостоверений о ПК по курсу Радиационная безопасность.pdf*
- Копии удостоверений о повышении квалификации по курсу повышения квалификации «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики». ФАЙЛ: *Прил. ПГ 3.3.11 Копии удостоверений о ПК по курсу Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики.pdf*
- Копия ведомости итоговой аттестации по курсу повышения квалификации «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров». ФАЙЛ: *Прил. ПГ 3.3.11 Копия ведомости итоговой аттестации по курсу ПК Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров.pdf*
- Копия ведомости итоговой аттестации по курсу повышения квалификации «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды». ФАЙЛ: *Прил. ПГ 3.3.11 Копия ведомости итоговой аттестации по курсу ПК Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды.pdf*
- Копия ведомости итоговой аттестации по курсу повышения квалификации «Радиационная безопасность». ФАЙЛ: *Прил. ПГ 3.3.11 Копия ведомости итоговой аттестации по курсу ПК Радиационная безопасность.pdf*
- Копии ведомостей итоговой аттестации по курсу повышения квалификации «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики». ФАЙЛ: *Прил. ПГ 3.3.11 Копии ведомостей итоговой аттестации по курсу ПК Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики.pdf*

3.3.12 Проведение в 2023 г. конференции обучающихся и исследователей в возрасте до 39 лет по тематике исследований (совместно с ИФМ УО РАН).

III Всероссийская научно-практическая конференция «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» посвящена рассмотрению задачам и методы нейтронных исследований конденсированных сред. Основные темы совещания были связаны с методикой нейтронного эксперимента, нейтронной техникой, созданием приборной базы источников нейтронов, а также применению рассеяния нейтронов для исследования конкретных систем.

На конференции было представлено двадцать три доклада, проводилось обсуждение широкого спектра вопросов, начиная от создания нейтронных установок и нейтронных детекторов до возможных сфер применения рассеяния нейтронов. В конференции выступили 20 участников в возрасте до 39 лет.

Организатором III Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» выступило Федеральное государственное бюджетное научное учреждение науки «Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук» (ИФМ УрО РАН), г. Екатеринбург.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Приказ о проведении III Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред». ФАЙЛ: *Прил. ПГ 3.3.12 Приказ о проведении конференции ЗМНИКС-2023.pdf*
- Скриншот страниц сайта в сети Интернет с информацией о проведенной III Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований

конденсированных сред». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.12 Скриншот страниц сайта с информацией о конференции ЭМНИКС-2023.pdf](#)

- Тезисы III Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.12 Тезисы ЭМНИКС-2023.pdf](#)
- Список участников III Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.12 Список участников конференции ЭМНИКС-2023.pdf](#)

3.3.13 Работы, выполняемые за счет финансирования из внебюджетных источников.

Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов археологического профиля (совместно с К(П)ФУ).

См. п. 3.3.1

На выполнение работ по п. 3.3.13 израсходовано 697 405 рублей из внебюджетных источников.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Данные удостоверений и ведомости аттестации археологического профиля. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.13 Данные удостоверений и ведомости аттестации археологического профиля.pdf](#)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все работы третьего этапа реализации проекта «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа» были завершены в срок и в полном объеме. Задачи третьего этапа включали в себя изготовление и тестирование детекторных систем разного типа, изготовление механических устройств управления потоком нейтронов, задачи по моделированию и научно-исследовательских изысканий свойств тонкопленочных структур, используемых или предполагаемых к использованию в детекторных технологиях. По всем задачам получены конкретные результаты, которые будут использованы при развитии методической базы на всех действующих источниках нейтронов в Российской Федерации и на планируемых к запуску в ближайшем будущем. Результаты выполненных работ нашли отражение в 15 публикациях и в 4 патентах на изобретение, вышедших в течение реализации 3-го этапа.

Закончены работы по созданию опытно-экспериментального участка для разработки и создания детекторов разных типов на базе ЛНФ ОИЯИ, подготовлены лаборатории для изготовления и испытания детекторов нейтронов в НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ г. Гатчина. Реализованные крупномасштабные инфраструктурные проекты обеспечат основу для производства детекторов тепловых нейтронов, необходимых для реализации практически любой методики исследований конденсированного состояния методами рассеяния нейтронов на источниках нейтронов в Российской Федерации.

В части подготовки молодых специалистов разработаны и внедрены учебные модули, по которым прошли обучение около 140 человек. Реализация разработанных курсов и практик показывает наличие большой заинтересованности у студентов тематиками, связанными с исследованиями, выполняемыми с помощью нейтронного и синхротронного излучения. Об этом говорит число студентов, изъявивших желание пройти обучение по разработанным в рамках Проекта курсам, которое превышает плановые показатели почти в 10 раз. Среди студентов, прошедших обучение по разработанным курсам, нашлось немало тех, кто выразил желание выбрать темой своих курсовых, дипломных работ тему, связанную с нейтронными и синхротронными исследованиями, что подтверждает высокий уровень разработанных программ и качества преподавания.

Успешно проведена третья Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» с международным участием. В работе конференции приняли участие 20 молодых ученых из разных вузов и научных центров Российской Федерации и ближнего зарубежья.

Все показатели, включая финансовые, которые планировалось достичь за время второго этапа проекта успешно выполнены, причем многие с перевыполнением плановых значений.

С материалами отчета и другой информацией о ходе выполнения работ в рамках проекта «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа» можно ознакомиться на сайте:

<https://flnp.jinr.int/ru/glavnaya/nauka/fizika-kondensirovannogo-sostoyaniya/programma-razrabotki-priborov-dlya-spektrometrov-ibr-2/proekt-minobrnauki>

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершился 3-х летний исследовательский проект проекта «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа». В рамках реализации проекта были решены масштабные задачи по развитию элементов приборной базы для станций нейтронного рассеяния на действующих и будущих источниках нейтронов на территории Российской Федерации. Результаты, полученные в рамках Проекта, являются весьма актуальными и своевременными, особенно учитывая, что в настоящее время идет процесс разработки и создания приборной базы нового исследовательского реактора ПИК в НИЦ «Курчатовский институт» в г. Гатчина, Большая часть Проекта была связана с развитием новых детекторных технологий, которые позволят создавать детекторы тепловых и холодных нейтронов с рекордными параметрами по быстродействию, временному и пространственному разрешениям. За время реализации Проекта были созданы новые детекторы на основе сцинтиллятора, на основе газа He-3 и на основе конвертера из карбида бора В4С. Эти материалы и раньше использовались при создании детекторов тепловых и холодных нейтронов, но параметры этих детекторов зачастую не соответствуют требованиям, предъявляемым к детекторным системам на современных станциях рассеяния нейтронов. Благодаря внедрению новых технологий, новых материалов, реализации оригинальных идей и подходов к компоновке детекторных камер удалось получить детекторы со значительно улучшенными параметрами по сравнению с используемыми в настоящее время на различных станциях нейтронного рассеяния. Некоторые разработки уже устанавливаются на перспективные установки нейтронного рассеяния. Например, сцинтилляционные детекторы с твердотельными фотоумножителями, разработанные совместно с ИЯИ РАН установлены на новый дифрактометр «СФЕРА» на источнике нейтронов ИН-06. Данные детекторы являются определяющей частью установки, и именно они во многом определяют уникальные параметры дифрактометра. Помимо разработки новых детекторов нейтронов в рамках Проекта создавались отдельные элементы установок нейтронного рассеяния. В частности, разработан и создан уникальный механический прерыватель нейтронного пучка, который может существенно подавлять фон от запаздывающих нейтронов, что является актуальным для источников нейтронов реакторного типа.

Большой объем работ был проделан для развития инфраструктуры, на базе которой можно продолжать исследования в области создания детекторов тепловых и холодных нейтронов. Были созданы лаборатории и производственные участки, которые позволят наладить мелкосерийный выпуск детекторов разного типа, для любой из методик, реализованных на станциях нейтронного рассеяния в Российской Федерации.

Важная часть проекта была посвящена подготовке молодых кадров для работы по специальностям, связанным с исследованиями, проводимыми с помощью рассеяния нейтронного излучения. На базе трех образовательных учреждений разработаны и внедрены образовательные курсы, по которым в общей сложности прошли обучение более 250 студентов и аспирантов. В 2021/2022 учебном году МФТИ по итогам конкурсного отбора получил право на проведение Всероссийской олимпиады студентов «Я – профессионал» по четырем направлениям, включая направление «Физика и технологии уникальных научных установок класса «мегасайенс», позволит студентам, заинтересованным в дальнейшей научной карьере, продолжить образование в вузах РФ, развивающих тематику исследований на установках «мегасайенс», и начать работу в составе научных коллективов таких организаций как ОИЯИ, ФИАН, ТРИНИТИ, НИЦ КИ, ИК СО РАН, ИЯИ РАН и др., а также в лабораториях МФТИ, НГУ и других университетов. На каждом из этапов выполнения проекта проводилась научно-практическая конференция для молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред». В конференциях приняли участие молодые ученые, студенты и аспиранты из ведущих вузов и научных центров Российской Федерации. Конференция хорошо зарекомендовала себя среди профессионального сообщества и в настоящее время идет работа по придании конференции статуса ежегодной.

Реализация этого проекта создает задел на многие годы вперед для успешного выполнения научно-технических и исследовательских задач по разработке, созданию и внедрению детекторов тепловых нейтронов разного типа для практически любой станции нейтронного рассеяния, которые работают в нейтронных центрах Российской Федерации. В общей сложности за три года было освоено 366 млн. руб. бюджетных средств и около 37 млн руб., привлеченных из внебюджетных

источников. За время выполнения проекта вышло 28 публикаций, получено 8 патентов, что превышает пороговые значения показателей.

Подводя итоги проделанной работе и полученным результатам можно констатировать, что Проект был успешным, все поставленные цели достигнуты, создан задел, который определит развитие данной тематики на многие годы вперед.

С материалами отчета и другой информацией о ходе выполнения работ в рамках проекта «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа» можно познакомиться на сайте: <https://flnp.jinr.int/ru/glavnaya/nauka/fizika-kondensirovannogo-sostoyaniya/programma-razrabotki-priborov-dlya-spektrometrov-ibr-2/proekt-minobrnauki>