

Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований

№ 121111900090-5  
И223012500110-1



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

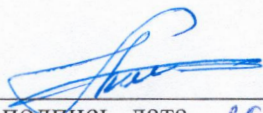
(промежуточный)

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)

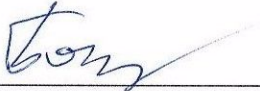

Руководитель проекта,  
д-р физ.-мат. наук

  
подпись, дата 25.01.2023г.

А.В. Белушкин

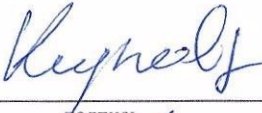
Дубна 2023

## 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. Садиллов</p>




Исполнитель проекта, с.н.с.	 подпись	А.В. Чураков
Исполнитель проекта, нач. группы, к-т физ.- мат. наук	 подпись	Т.Е. Еник
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	 подпись	А.С. Кирилов
Исполнитель проекта, инженер	 подпись	П.А. Кислицын



Исполнитель проекта, лаборант физ.лаб.	 _____ <small>подпись</small>	И.В. Ковалев
Исполнитель проекта, научный сотрудник	 _____ <small>подпись</small>	А.К. Курилкин
Исполнитель проекта, снс	 _____ <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	 _____ <small>подпись</small>	М.М. Подлесный
Исполнитель проекта, внс	 _____ <small>подпись</small>	В.И. Приходько
Исполнитель проекта, инженер	 _____ <small>подпись</small>	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	 подпись	А.И. Кушлин



Исполнитель проекта, ведущий конструктор	 _____	Ф.М. Котлыков
Исполнитель проекта старший лаборант	 _____	А.А. Евсеев
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	Руководитель работ
1.	Государственный университет «Дубна»	<b>Е.А. Давыдов</b> Доцент, кандидат физико-математических наук
2.	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»	<b>М.Р. Гафуров</b> Директор Института физики, доктор физико-математических наук
3.	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»	<b>А.В. Рогачев</b> 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»	<b>Е.В. Алтынбаев</b> И.О. Зам. Зав. ОДНИ ИЦ НТ, кандидат физико-математических наук
5.	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской Академии наук	<b>Р.А. Садыков</b> 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	<b>Е.А. Кравцов</b> 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 <sub>4</sub> 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 <sub>4</sub> С на алюминиевой подложке	23
2.1.4 Изготовление и испытания позиционно-чувствительного мониторингового детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора В <sub>4</sub> 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 200х200 мм <sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2х2 мм <sup>2</sup> 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 100х100 мм <sup>2</sup> , пространственным разрешением не хуже 1.5х1.5х0.05 мм <sup>3</sup> . (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 <sup>2</sup> . (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 <sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2x2 мм <sup>2</sup> 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 <sup>2</sup> . (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 <sub>4</sub> 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 <sup>2</sup> . (Совместно с НИЦ КИ ПИЯФ).	88
2.1.26 Сравнительный анализ изменения характеристик конвертеров из аморфного бора <sup>10</sup> B и конвертера в виде тонкой плёнки карбида бора <sup>10</sup> B <sub>4</sub> 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
$\lambda$	- 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  $200 \times 200$  мм<sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее  $2 \times 2$  мм<sup>2</sup> с поканальной регистрацией сигнала; регистрирующий газоразрядный модуль с твердотельным конвертером с активной площадью не менее  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup>, пространственным разрешением не хуже  $1.5 \times 1.5 \times 0.05$  мм<sup>3</sup>; двумерный позиционно-чувствительный счетчик нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup>. Разработан прототип двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6 LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей апертурой не менее  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup>. 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, 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». 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.

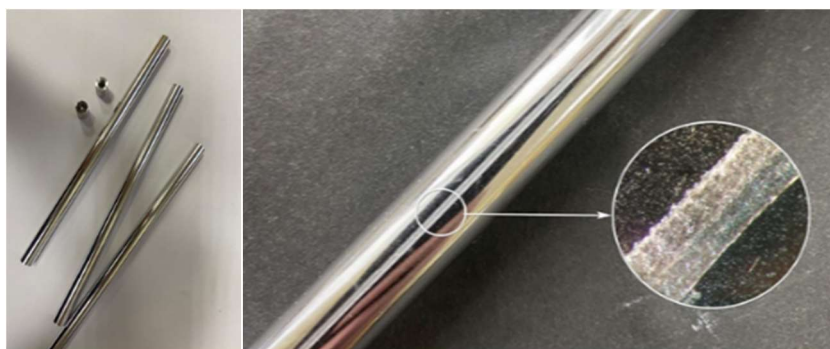


Рисунок 2.1.1.1. Сварной шов трубки из лавсана с покрытием  $B_4C$  на внутренней стороне цилиндра.

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)

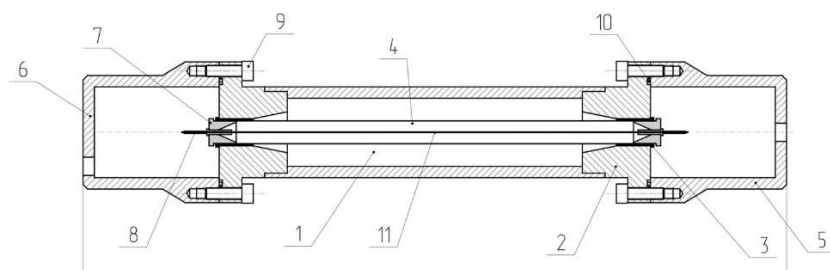


Рисунок 2.1.1.2. Слева - корпус строу детектора; справа – чертеж корпуса строу детектора.



Рисунок 2.1.1.3. Установка прототипа детектора для тестов с источником нейтронов.

Измерения проводились с источником нейтронов  $^{252}\text{Cf}$ , 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.

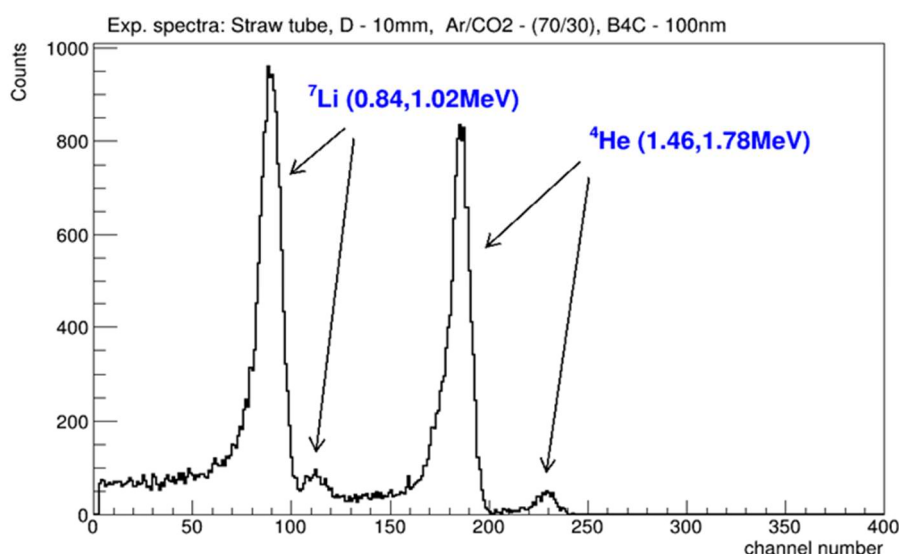


Рисунок 2.1.1.4. Амплитудный спектр строу-трубки.

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  $^{252}\text{Cf}$  + полиэтиленовый замедлитель, для строу-трубки с конвертером  $\text{B}_4\text{C}$  толщиной 100нм составляет 0.67%.

На рисунке 2.1.1.5 представлены амплитудный спектр, измеренный с источником  $^{252}\text{Cf}$  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.

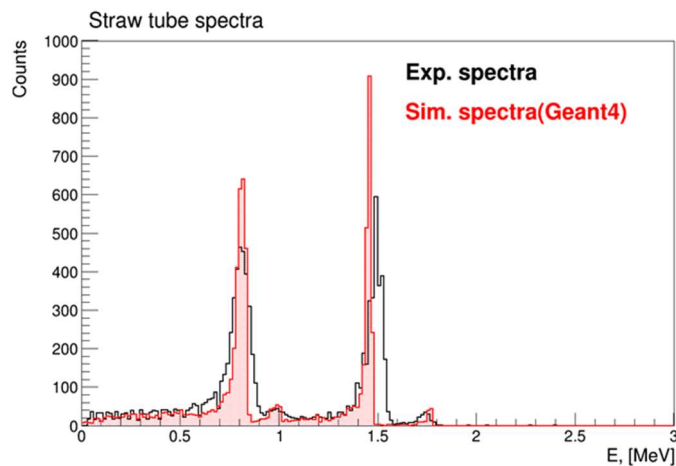


Рисунок 2.1.1.5. Амплитудный спектр вторичных частиц: черный спектр — экспериментальный спектр, красный — результат моделирования без учета процесса ионизации.

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 В<sub>4</sub>С на рулонные материалы из полимерных плёнок и металлической фольги. 2 очередь

Проведен 2-й этап реконструкции вакуумной установки VSR300 под нанесение карбида бора В<sub>4</sub>С на рулонные материалы. В соответствии с разработанной конструкторской документацией установка обеспечивает кинематику перематывания пленки под магнетронное нанесение карбида бора В<sub>4</sub>С 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 В<sub>4</sub>С 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 В<sub>4</sub>С на рулонные материалы (рис. 2.1.2.1).



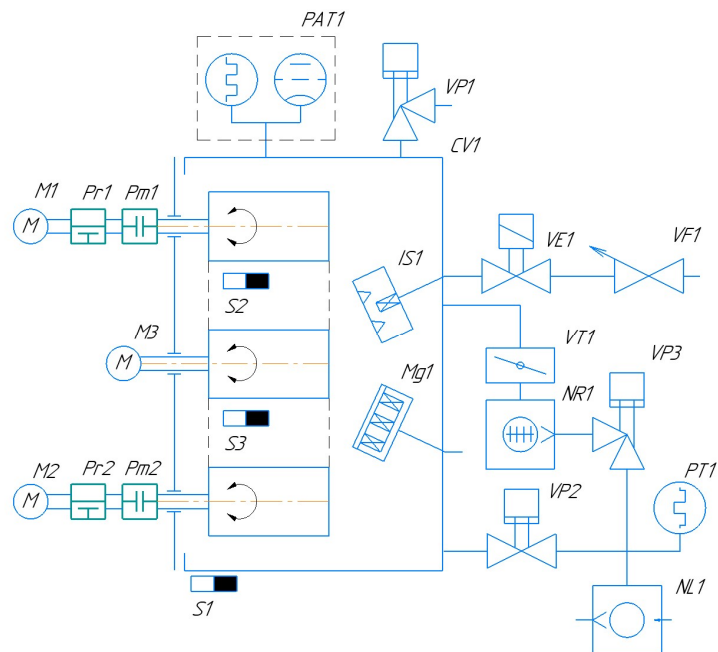


Рисунок 2.1.2.1. Вакуумная схема

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.

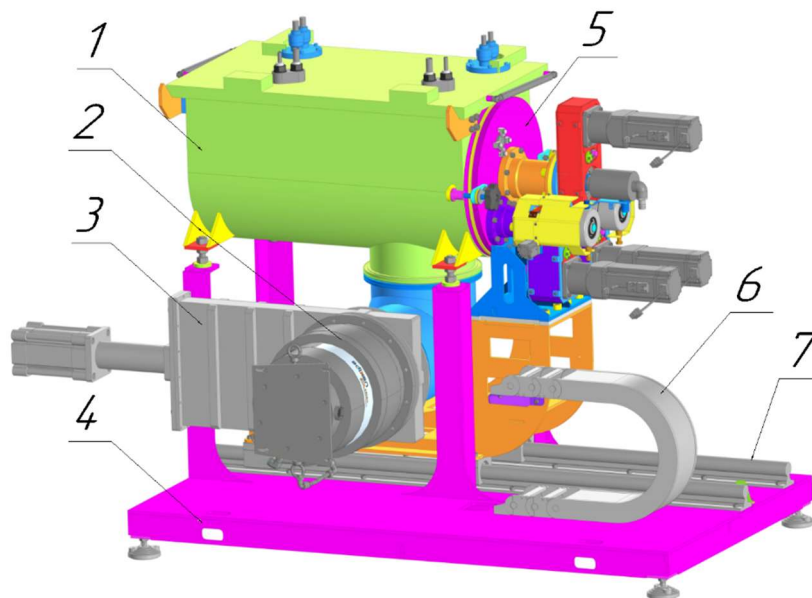


Рисунок 2.1.2.3. Общий вид вакуумного поста. Обозначения на рисунке: 1 - вакуумная камера, 2 - турбомолекулярный насос, 3 - высоковакуумный насос, 4 - рама, 5 - система перемотки, 6 - гибкий кабель-канал, 7 – направляющие. (Форвакуумный насос на рисунке не представлен)

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»).

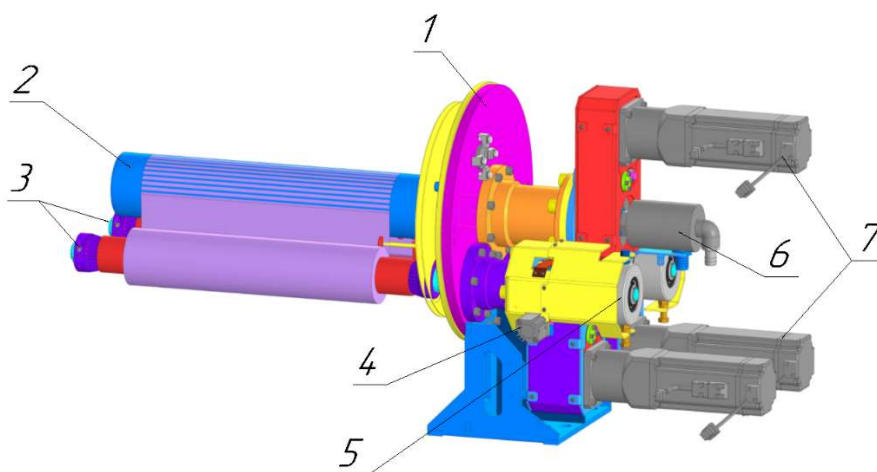


Рисунок 2.1.2.4. Система перемотки. Обозначения на рисунке: 1 - откатная дверь вакуумной камеры, 2 - водоохлаждаемый барабан, 3 - перематывающие барабаны, 4 - система удержания, 5 - пневмомуфта, 6 - ротационный ввод воды, 7 - сервопривода.

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 фокусируются 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.

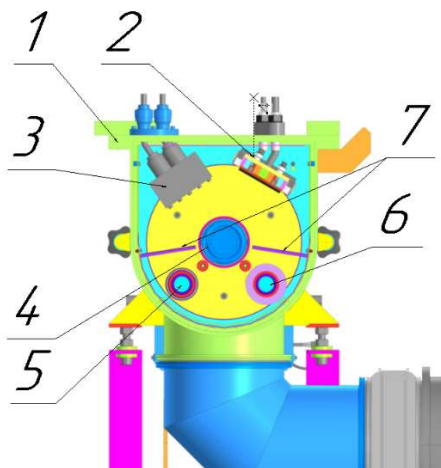


Рисунок 2.1.2.5. Вакуумная камера в разрезе. Обозначения на рисунке: 1 - вакуумная камера, 2 - магнетрон, 3 - ионный источник, 4 - водоохлаждаемый барабан, 5 и 6 - перематывающие барабаны, 7 - защитные экраны.

#### 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 см<sup>2</sup>.

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.

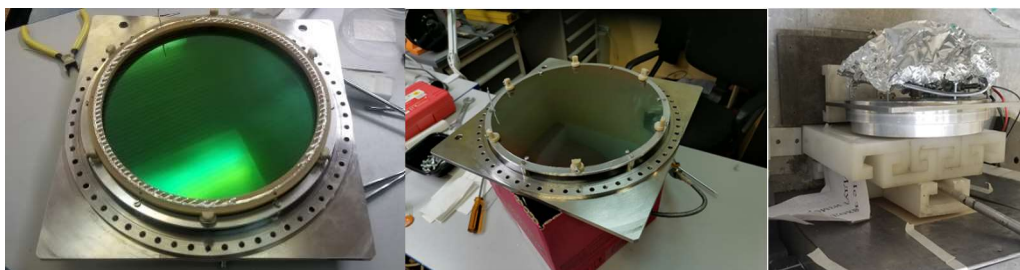


Рисунок 2.1.3.1. Детектор тепловых нейтронов на основе В<sub>4</sub>С.

С помощью детектора проведены исследования по изучению влияния толщины напыления <sup>10</sup>В<sub>4</sub>С конвертера тепловых нейтронов, состава газовой смеси и рабочего давления на его рабочие характеристики. Измерения проводились при использовании источника нейтронов <sup>252</sup>Cf и замедлителя из полиэтилена. Амплитудные спектры продуктов реакции n + <sup>10</sup>B 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 В<sub>4</sub>С на характеристики детектора выполнялось посредством замены пластин с конвертером. В измерениях использовались пластины, изготовленные в ESS (European Spallation Source) - (термополированные стекла с толщиной слоя В<sub>4</sub>С - 500, 1000 и 2000 нм) и в Государственном университете Дубна (алюминиевые пластины толщиной 0.5 мм с толщиной слоя В<sub>4</sub>С - 300, 440 и 1000 нм).

Измерения проводились с рабочей смесью Ag/CO<sub>2</sub>(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 <sup>252</sup>Cf было одинаковым для всех измерений.

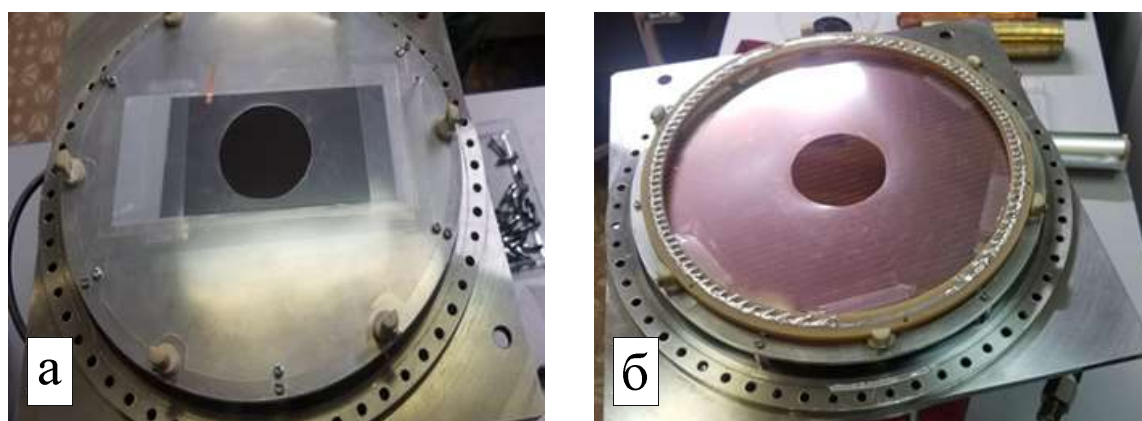


Рисунок 2.1.3.2. Сборка детектора а) - с термополированным стеклом с толщиной слоя В<sub>4</sub>С – 1 мкм ESS ERIC; б) - с алюминиевой пластиной с толщиной слоя В<sub>4</sub>С – 1 мкм Университет Дубна.

На рисунке 2.1.3.3. а) представлены амплитудные спектры, полученные при измерениях с конвертерами, произведенными в ESS, с толщиной слоя В<sub>4</sub>С – 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 В<sub>4</sub>С соответствующая напыленному слою на стеклах ESS.



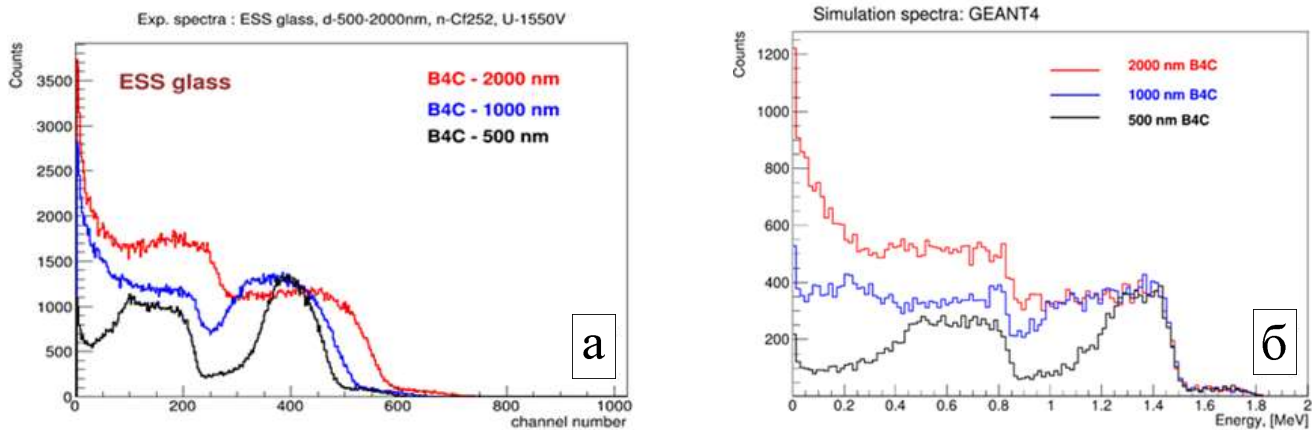


Рисунок 2.1.3.3. Амплитудные спектры а) полученные при измерении конвертера, произведенного в ESS, с толщиной слоя В<sub>4</sub>С – 500, 1000 и 2000 нм и б) расчётные спектры, полученные в пакете GEANT4.

Также было проведено сравнение амплитудных спектров, измеренных с образцами конвертеров ESS и Университета Дубна, с толщиной слоя В<sub>4</sub>С 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 <sup>252</sup>Cf+ полиэтиленовый замедлитель, для детектора с образцом конвертера Университета Дубна толщиной 1000нм составляет 3%.

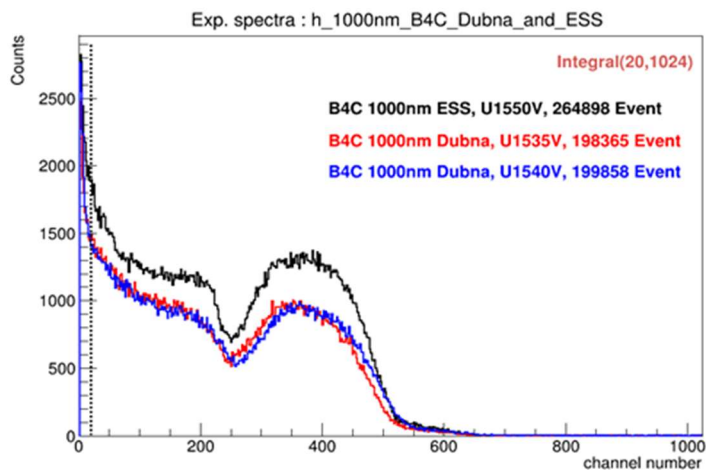


Рисунок 2.1.3.4. Сравнение спектров полученных при измерении стекол (ESS) и алюминиевых пластин (Дубна) с толщиной слоя <sup>10</sup>B<sub>4</sub>С 1000 нм.

Исследование влияния состава газовой смеси на рабочие характеристики было проведено с использованием Ar/CF<sub>4</sub> (94%/6%), Ar/CO<sub>2</sub>(90%/10%) и Ar/CO<sub>2</sub>(97%/3%) при давлении 1000 мбар. Полученные в результате измерений спектры (Рисунки 2.1.3.5. а) и б)) показали, что для смесей Ar/CO<sub>2</sub> наблюдается меньшая чувствительность к гамма-фону и лучшая энергетическая разрешающая способность.

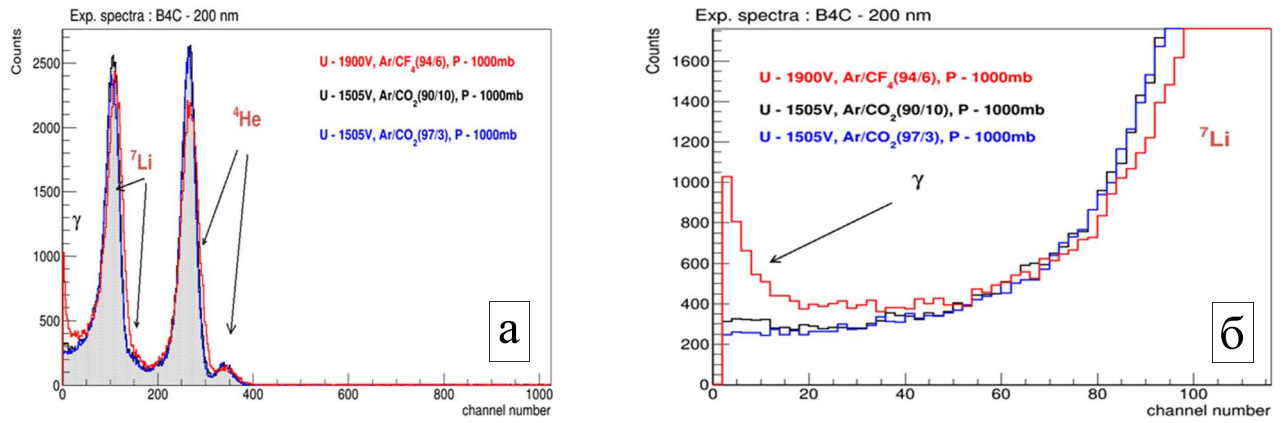


Рисунок 2.1.3.5. Влияние различных составов газовых смесей Ar/CF<sub>4</sub>(94%/6%), Ar/CO<sub>2</sub>(90%/10%) и Ar/CO<sub>2</sub>(97%/3%). а) - амплитудные спектры (общий вид) и б) начальный участок амплитудных спектров (видно различие в регистрации гамма).

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/CF<sub>4</sub> (94%/6%). Перед каждым измерением детектор подключался к вакуумному пульта, 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.

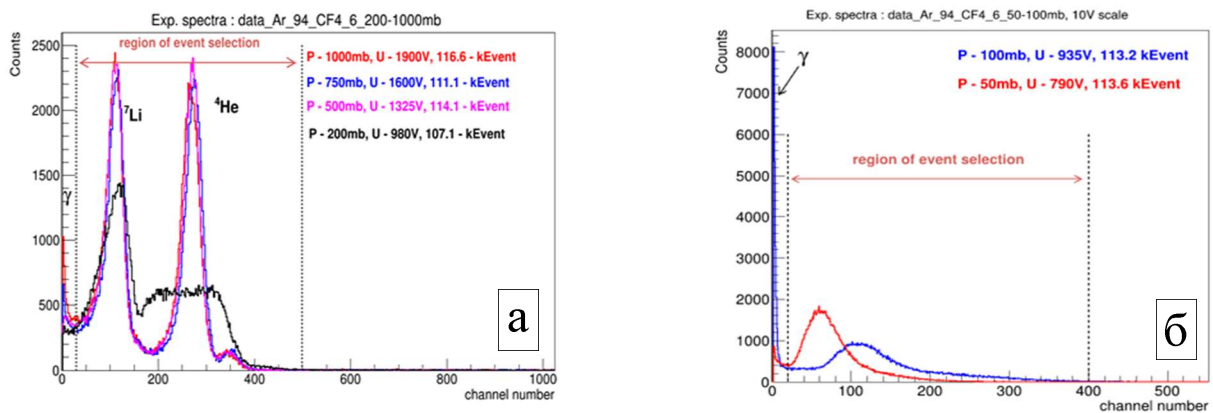


Рисунок 2.1.3.6. а) - амплитудных спектров 1000, 750, 500, и 200 мбар б) - амплитудных спектров 100 и 50мбар.

Большой объем проведенных измерений с газовым детектором медленных нейтронов с твердотельным конвертером В<sub>4</sub>С 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 В<sub>4</sub>С**

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 <sup>10</sup>В<sub>4</sub>С, 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.

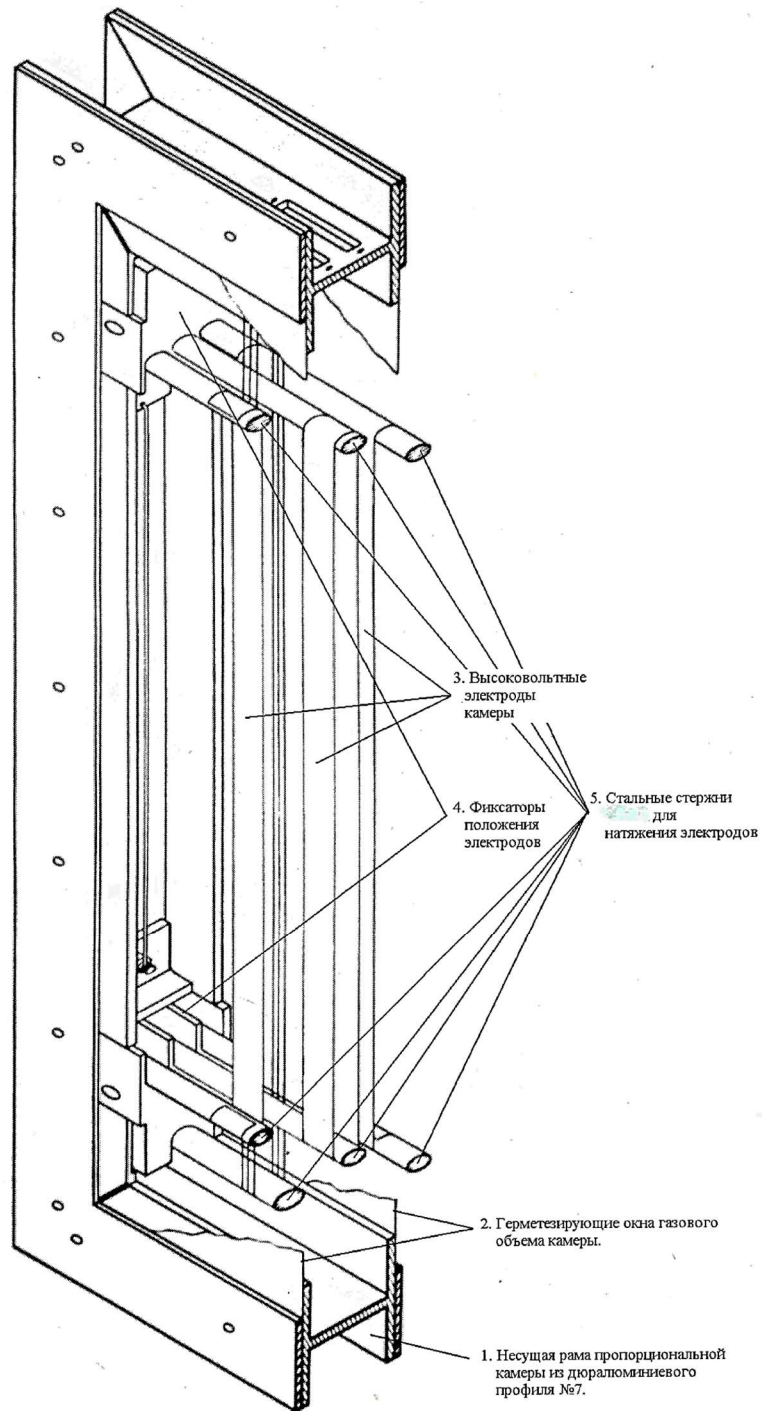
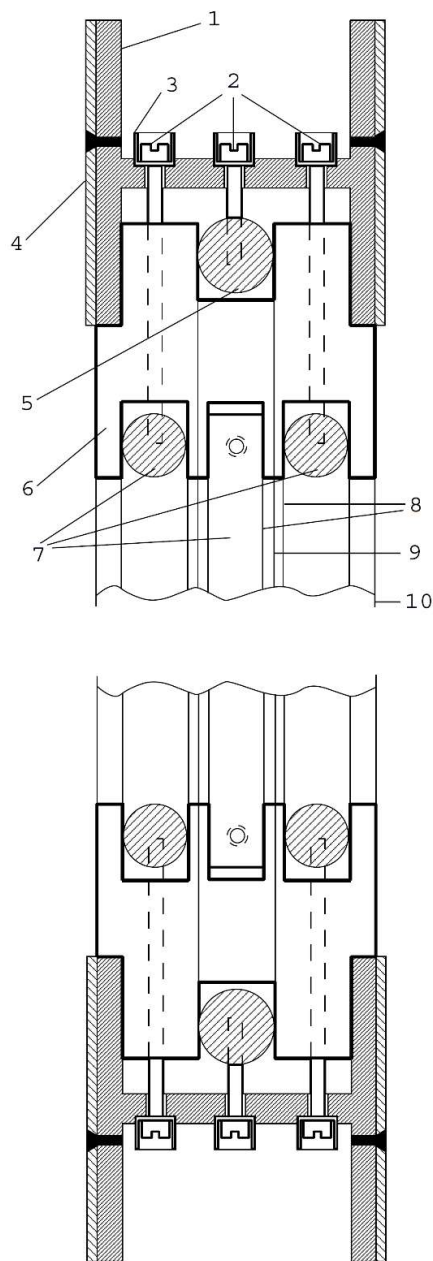


Рисунок 2.1.4.1. Слева - сечение узкоазорной камеры. Обозначения на рисунке: 1 – несущая рама, 2 – винты для натяжения анодных и катодных плоскостей, 3 – втулка для герметизации, 4 – рамка для прижима входного окна, 5 – анодный стержень, 6 – фиксатор, 7 – катодные стержни, 8 – катоды, 9 – анодные проволоки, 10 – входное окно. Справа - конструкция многопроволочной камеры.



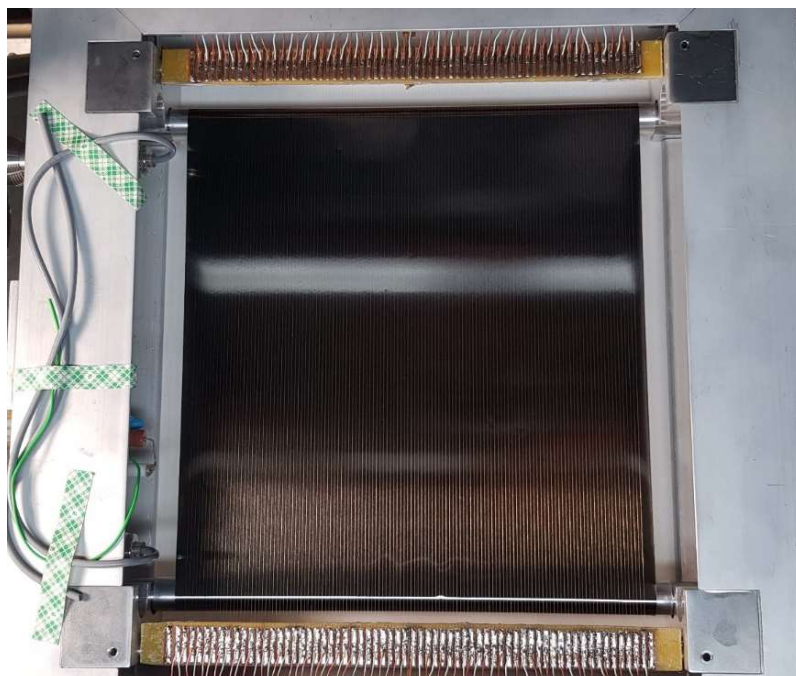


Рисунок 2.1.4.2. Регистрируемая часть детектора с конвертером из карбида бора, нанесенным на установке VSR300.

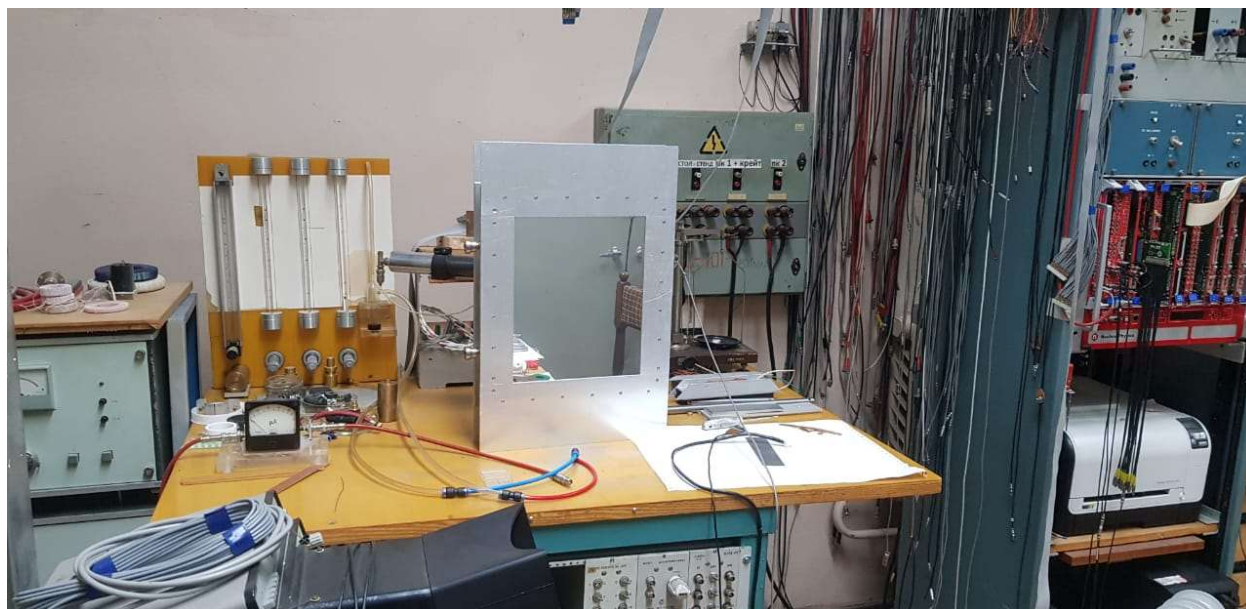


Рисунок 2.1.4.3. Тестирование изготовленного детектора.

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.

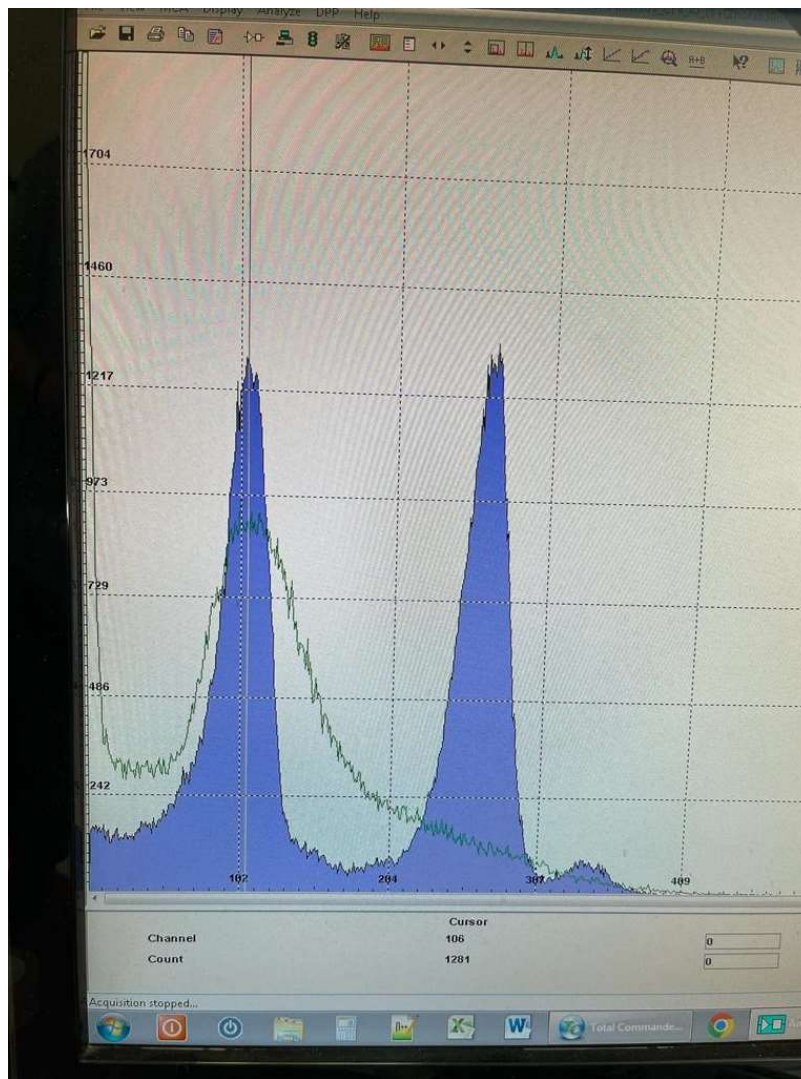
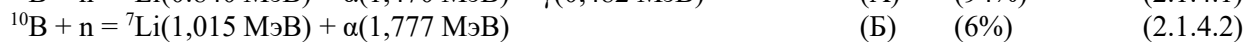
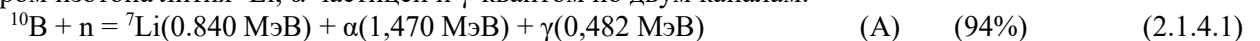


Рисунок 2.1.4.4. Амплитудный спектр при измерениях с конвертером из карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ .

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  $^{10}\text{B}$ . Сечение взаимодействия изотопа бора  $^{10}\text{B}$  с тепловыми нейтронами 0,025МэВ составляет 3800 барн. Медленные нейтроны взаимодействуют с ядрами изотопа бора  $^{10}\text{B}$  с выделением 2,78МэВ. Энергия распределяется между ядром изотопа лития  $^7\text{Li}$ ,  $\alpha$ -частицей и  $\gamma$ -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  $^{252}\text{Cf}$ .

#### ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт изготовления позиционно-чувствительного мониторингового детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$  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  $\text{B}_4\text{C}$  №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).



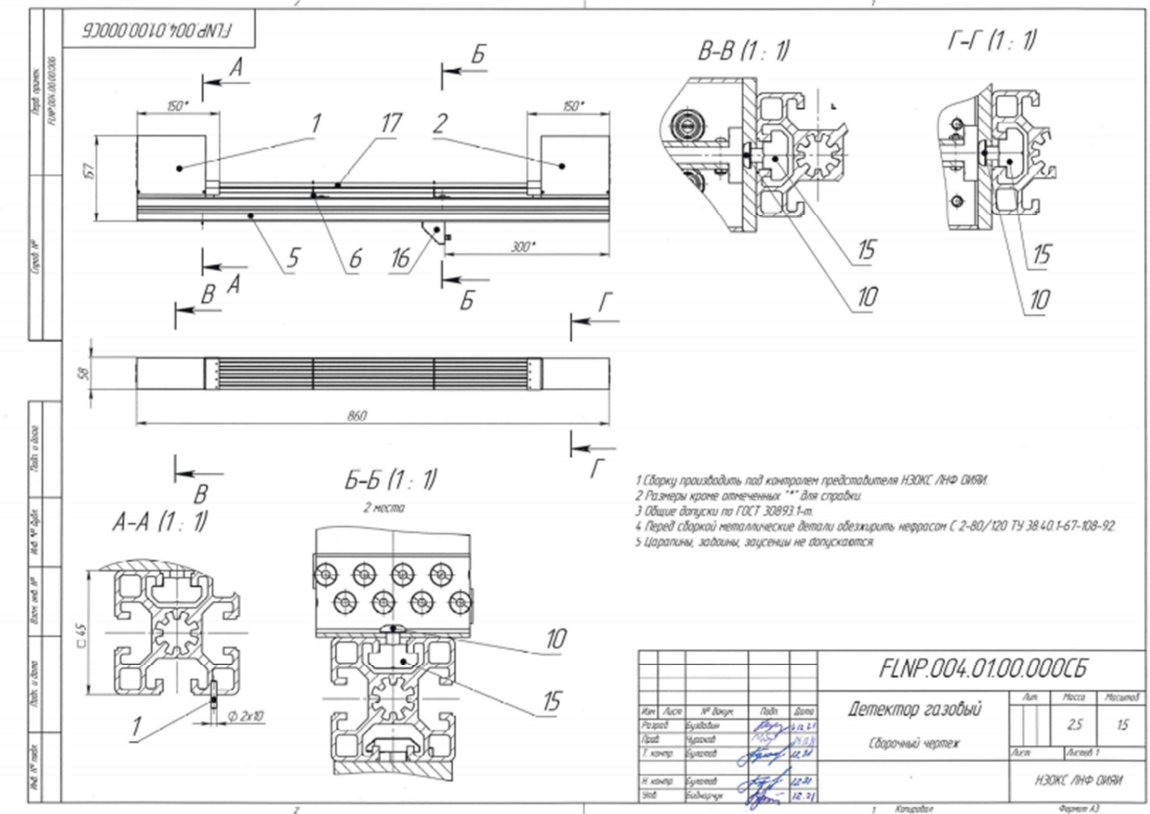


Рисунок 2.1.5.1. Чертеж детектора.

Тестирование детектора и работы по определению его параметров проводились с лабораторным источником нейтронов  $^{252}\text{Cf}$  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.

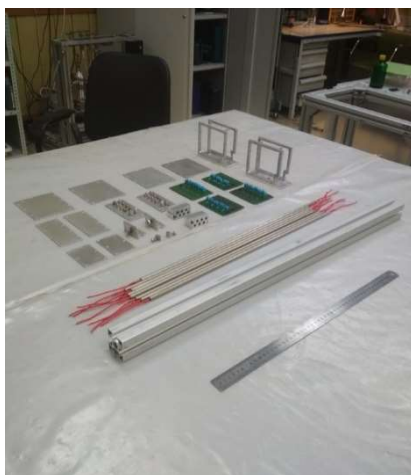


Рисунок 2.1.5.2. Компоненты детектора перед сборкой



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.

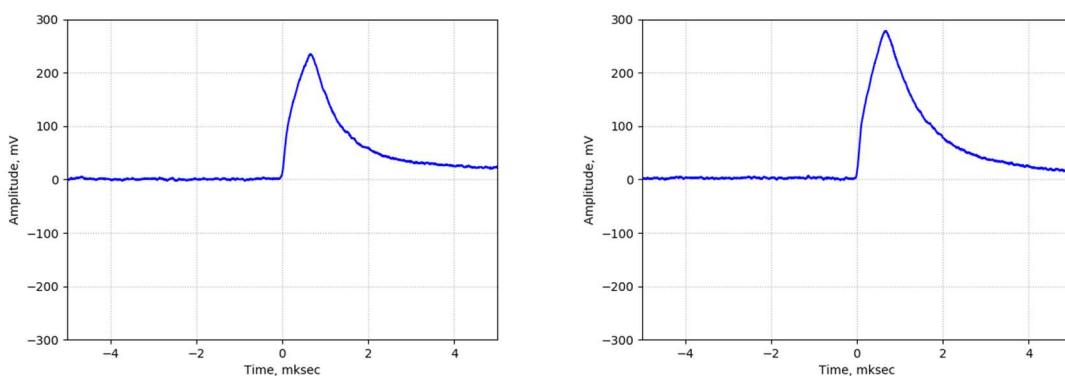


Рисунок 2.1.5.4. Осциллограммы сигнала от нейтрона. Слева - сигнал с левого конца счётчика, справа - сигнал с правого конца счетчика. Счетчик №1, напряжение на аноде +1350 В, осциллограф Лесрой Waverunner 8054, порог 10 мВ.



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.

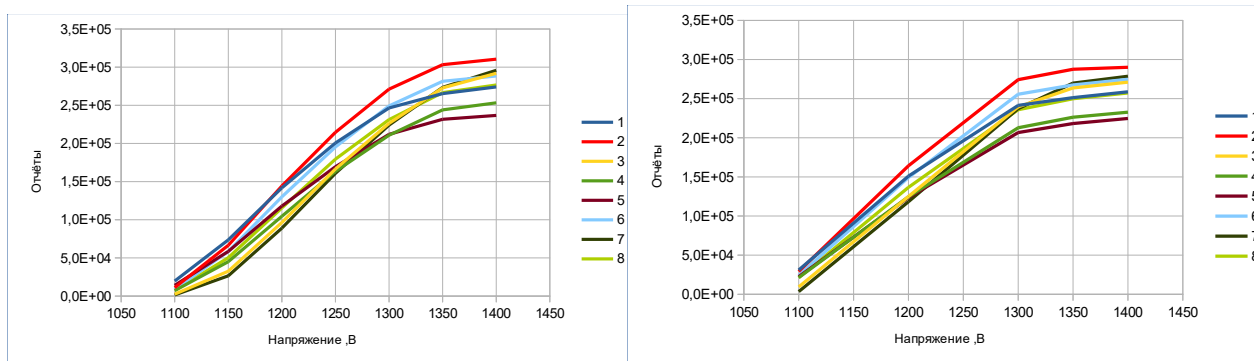


Рисунок 2.1.5.5. Счетные характеристики модуля из 8-трубок. Слева - крайнее верхнее положение модуля в пучке. Измерено на 5-м канале ИР-8 12.12.2022. Время измерения одной точки 100 секунд. Справа - модуль на 20 см ниже крайнего верхнего положения. Измерено на 5 канале ИР-8 12.12.2022, измерения 50-54. (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  $\sim 0,5\%$  от длины счетчика. Оценка результатов измерения проводилась с использованием программного комплекса ROOT 6.

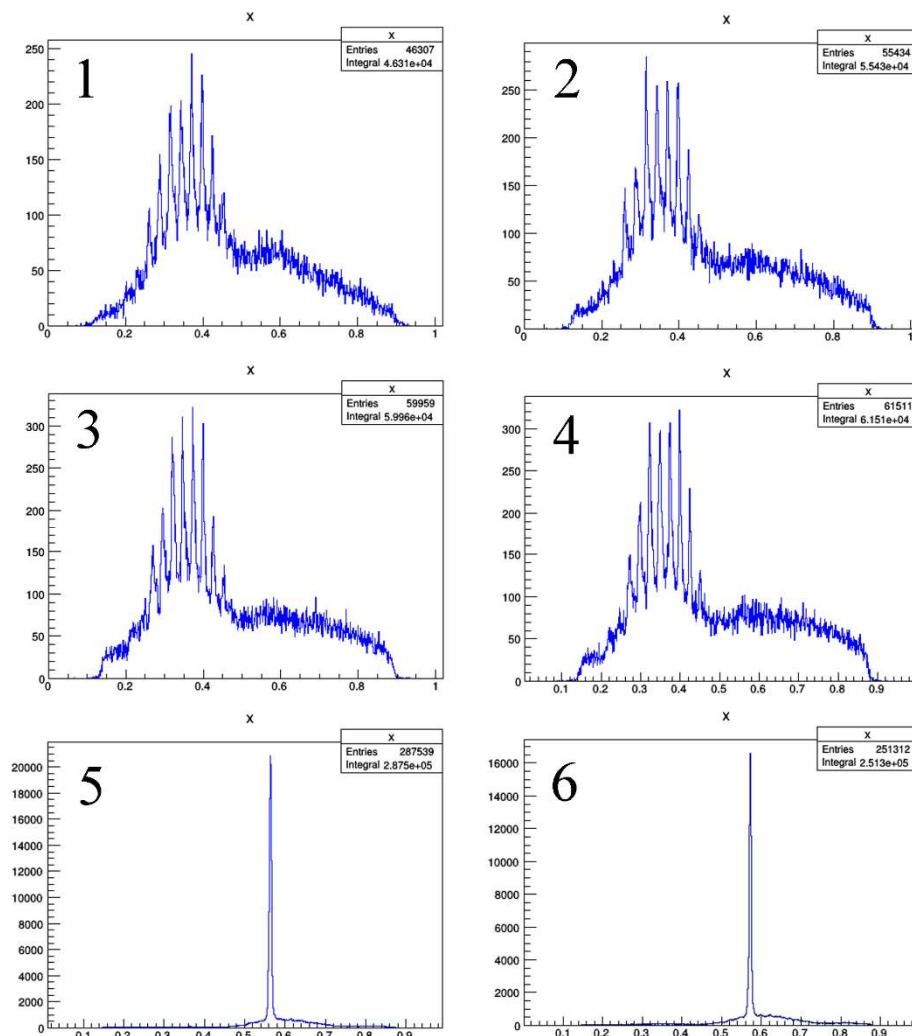


Рисунок 2.1.5.6. Калибровочные координатные спектры. В прямом пучке ослабитель - 30 мм плексиглас. Время измерения 100 секунд. 1) счетчик №7. Все щели открыты. Напряжение +1300 В, 2) счетчик №7. Все щели открыты. Напряжение +1350 В, время измерения 100 секунд. 3) Счетчик №6. Все щели открыты. Напряжение +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 мм<sup>2</sup> 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 <sup>3</sup>He 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)

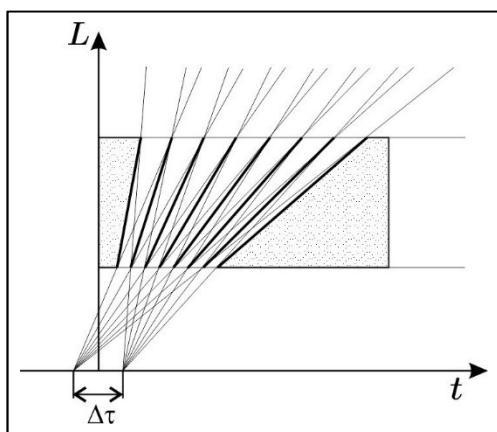


Рисунок 2.1.6.1. Времяпролетная диаграмма механического прерывателя пучка с временной фокусировкой. Никакие нейтроны, кроме тех, что были излучены в интервале времени  $\Delta\tau$ , не смогут попасть в детектор.

Разрабатываемый прерыватель пучка (Рис. 2.1.6.2 а) позволяет уменьшить временное окно видимости источника  $\Delta t$  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  $\varphi_0^k$ . Угловая координата канала вдоль оси  $Z$  задается выражением:

$$\varphi^k(z) = \varphi_0^k + \alpha^k z, \quad (2.1.6.1)$$

где  $\alpha^k$  – 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,  $\beta$  – коэффициент, описывающий его уширение.

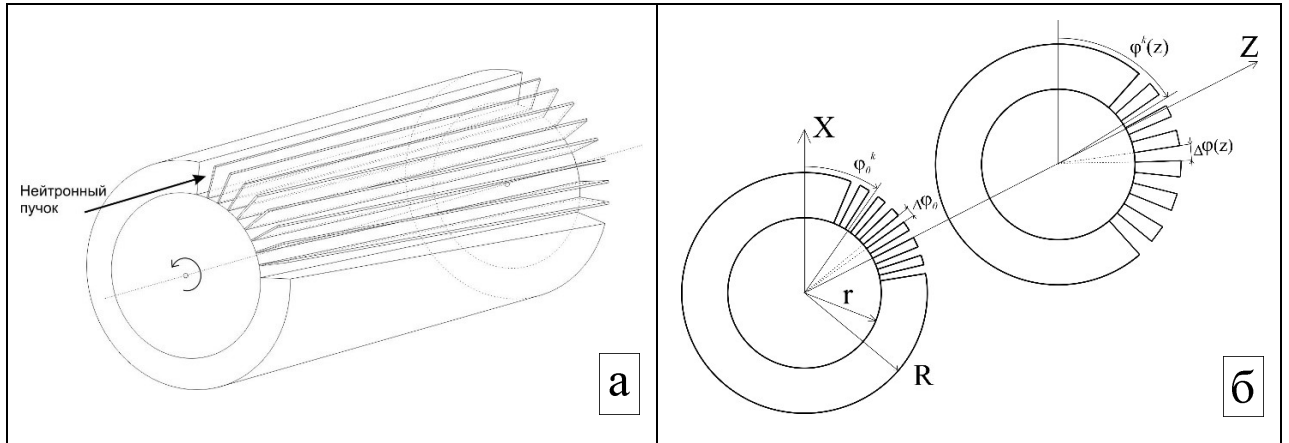


Рисунок 2.1.6.2. Механический фильтр нейтронного пучка с временной фокусировкой. а) общий вид фильтра; б) детальная конфигурация каналов механического фильтра в цилиндрической системе координат.

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).

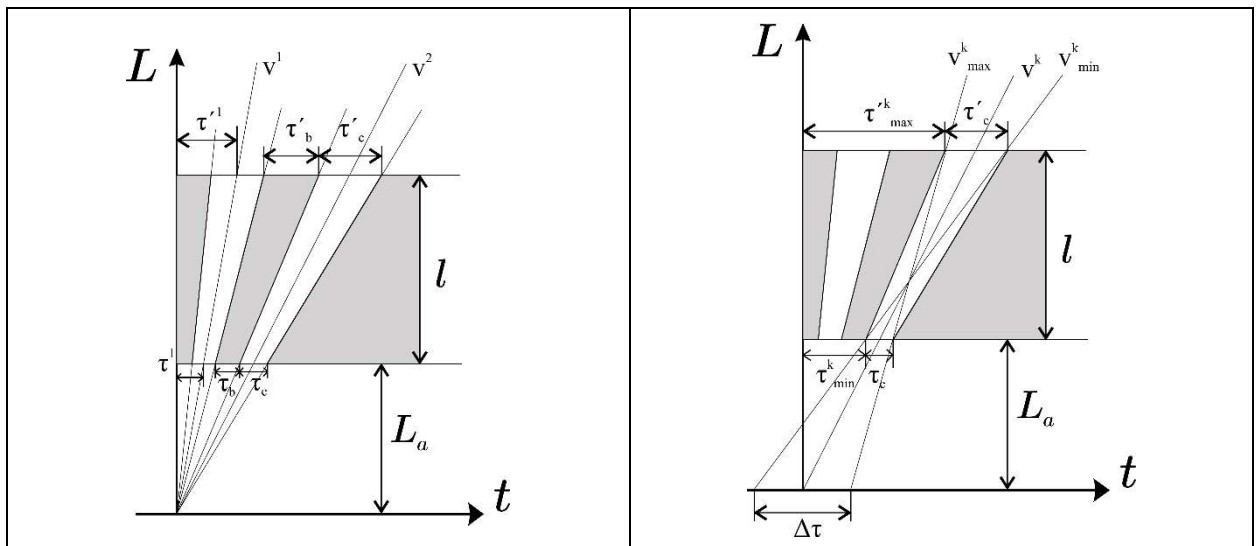


Рисунок 2.1.6.3. Время–пролетная диаграмма для фильтра с линейно увеличивающейся толщиной перегородок. Каналы сфокусированы в точку  $t = 0$ .

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  $\varphi_d = 1.031^\circ$ .

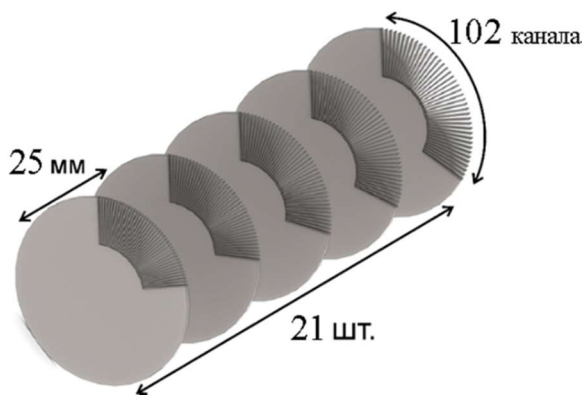


Рисунок 2.1.6.4. Схема фильтра, используемого при Монте-Карло моделировании в программном пакете VITESS. Применяется последовательность из 21 дисковых прерывателей (для наглядности на рисунке отображено только 5 прерывателей).

Результаты работы по уменьшению времени видимости источника фильтра данной конфигурации представлены на рисунке 2.1.6.5.

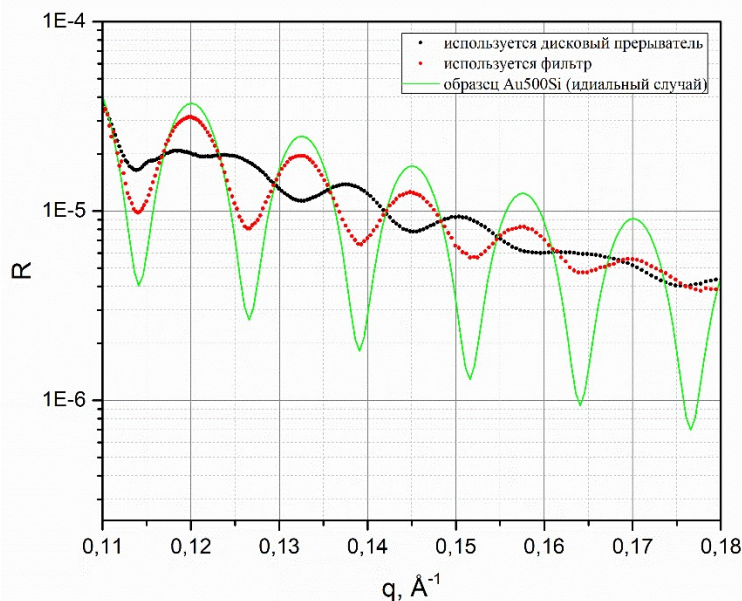


Рисунок 2.1.6.5. Результат работы фильтра и сравнение с дисковым прерывателем. Уменьшение времени видимости источника нейтронов в результате работы фильтра приводит к лучшему разрешению.

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 нейтронной 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, WO<sub>2</sub>, Ni<sub>3</sub>Mn). 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 нейтронотводы, 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 нейтронотвод 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 нейтронотводом для улучшения фоновых условий может быть использовано устройство [2.1.7.7].

Технология создания нейтронотводов в настоящее время хорошо развита, нейтронотводными системами снабжены множество спектрометров во многих нейтронных центрах. Задача по созданию нейтронотводной 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 нейтронотвода 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 нейтронотводной системы по параметру цена-качество.

Расчёт конфигурации нейтронотводной 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 нейтронотвода включала в себя источник нейтронов (замедлитель) с габаритами 20 см x 20 см. Расстояние от поверхности замедлителя до начала нейтронотвода 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 нейтронотвода является величина 150 мм. Большой размер приводит к неполной загруженности нейтронотвода. Предлагаемый для использования и оптимизации вариант нейтронотвода 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).

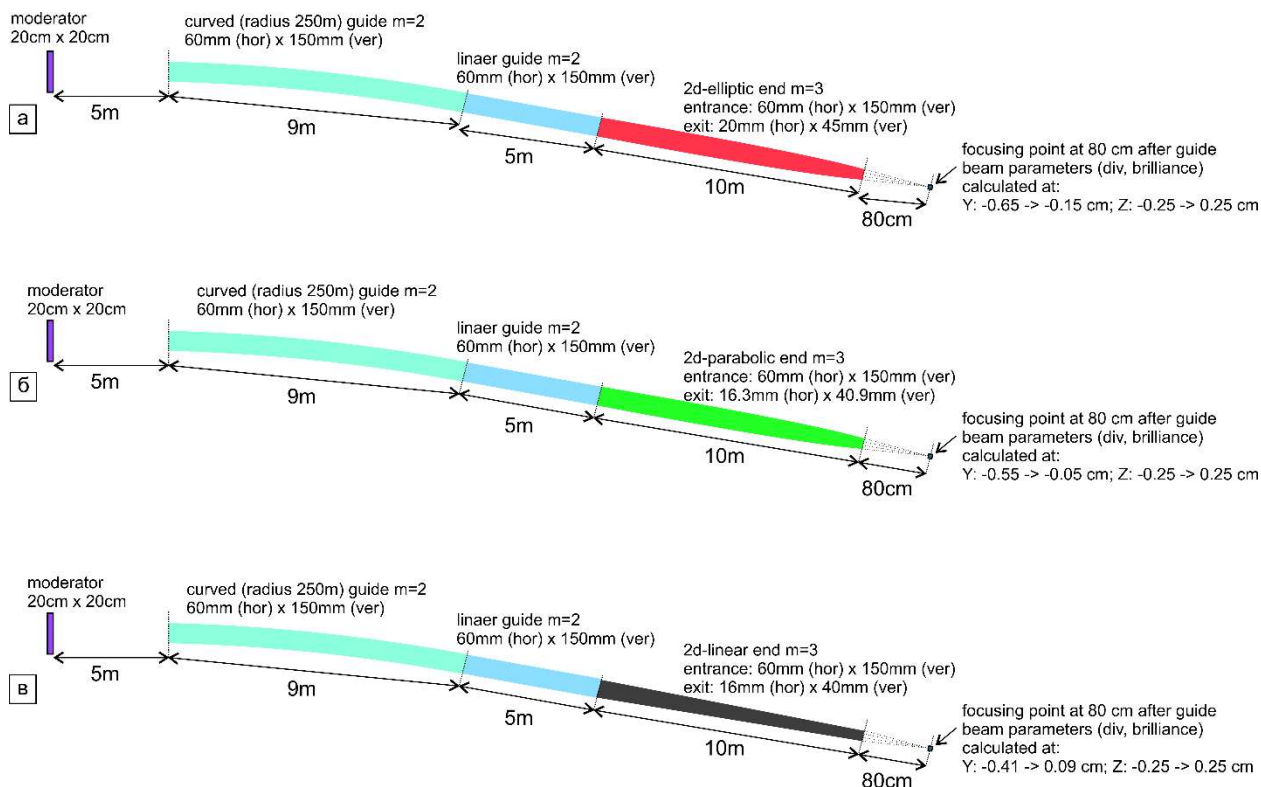


Рисунок 2.1.7.1. Схема предлагаемой нейтронотводной системы. а) последняя секция нейтронотвода имеет эллиптическую форму в обеих плоскостях OY и OZ. б) последняя секция имеет параболическую форму в обеих плоскостях. в) последняя секция линейно сужается в обеих плоскостях.

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).

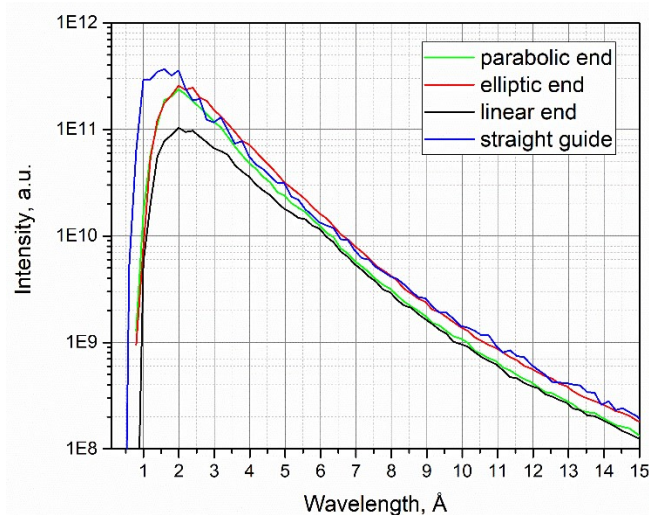


Рисунок 2.1.7.2. Интенсивность нейтронов, полученная в области 5 мм x 5 мм, на месте расположения образца на расстоянии 80 см от выхода нейтронновода. Синим указаны данные, получение при прямом нейтронноводе длиной 24 м постоянного сечения 60 мм x 150 мм.

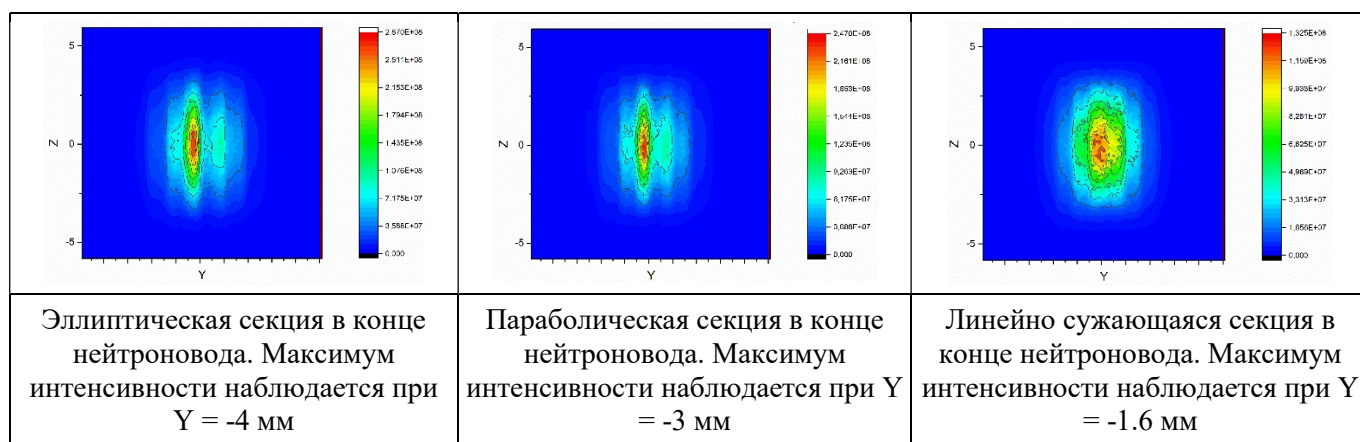


Рисунок 2.1.7.3. Интенсивность нейтронов в поперечном сечении в месте расположения образца для трех конфигураций нейтронноводной системы.

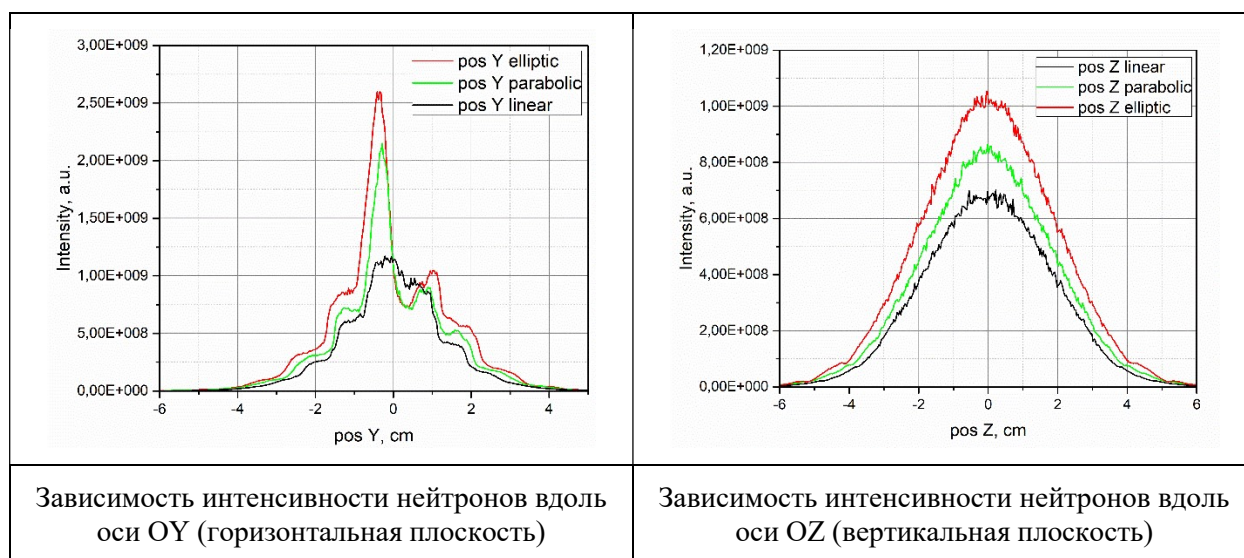


Рисунок 2.1.7.4. Зависимость интенсивности нейтронов от поперечной координаты в месте расположения образца.

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).

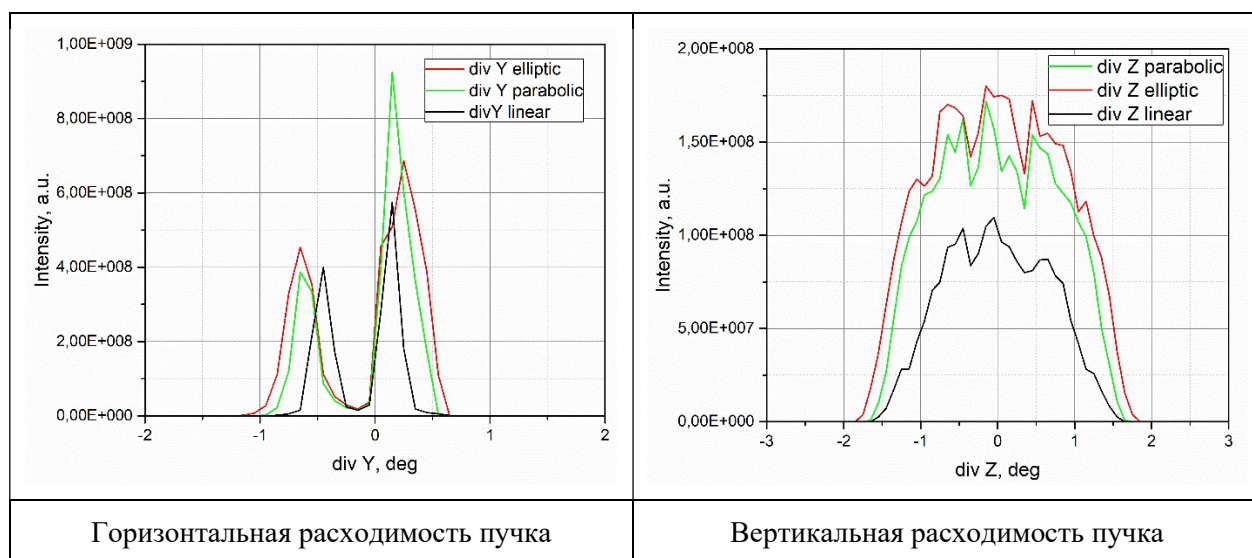


Рисунок 2.1.7.5. Расходимость пучка в месте размещения образца в области 5 мм x 5 мм.

Результаты моделирования демонстрируют, что наибольшего потока на образце можно добиться, установив эллиптическую фокусирующую секцию в конце нейтроновода (Рис. 2.1.7.1a). 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  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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.

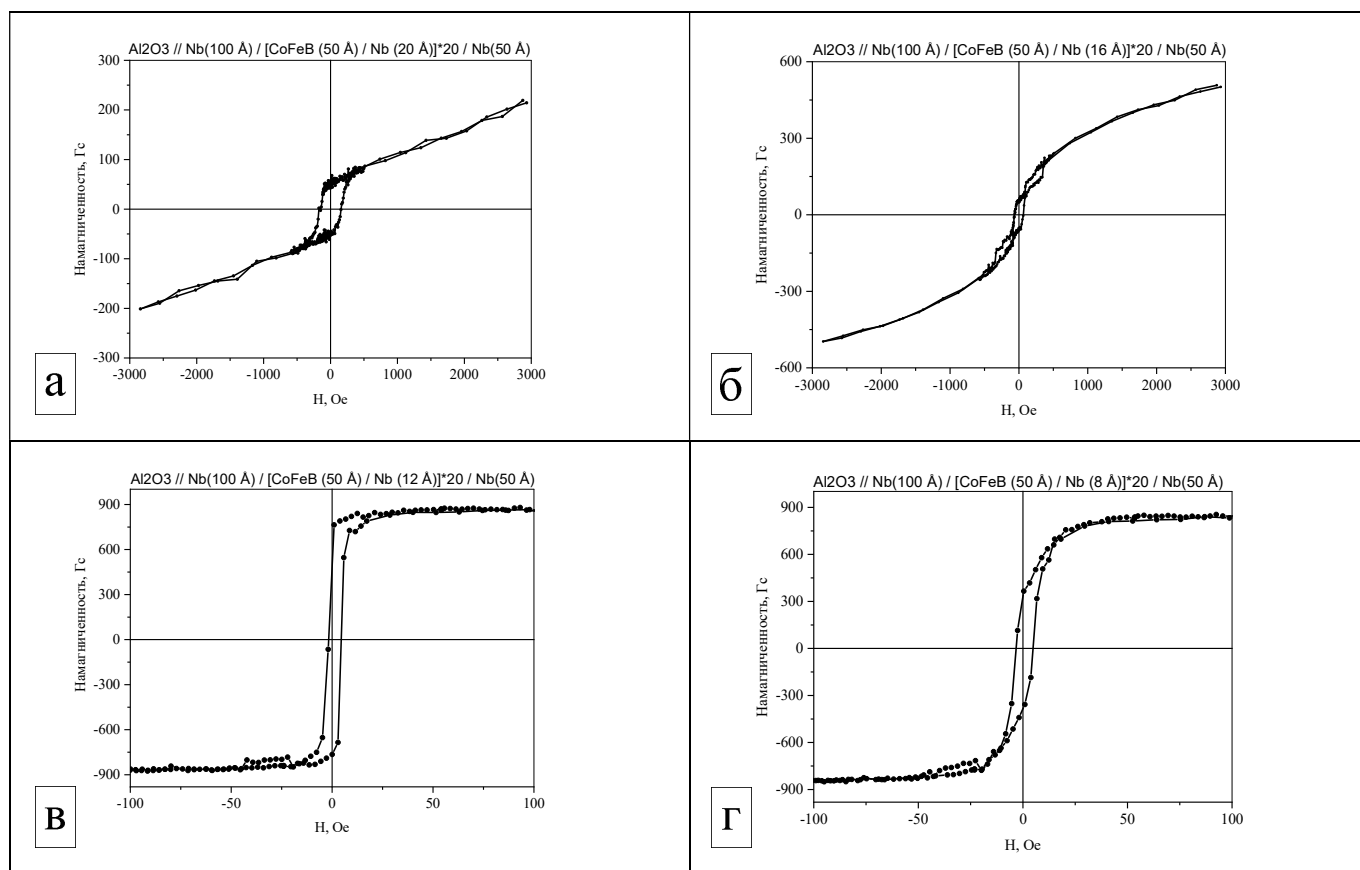


Рисунок 2.1.8.1. Зависимости намагниченности от индукции приложенного магнитного поля: а) петля гистерезиса для образца №2, измеренная при  $T=300 \text{ K}$ ; б) петля гистерезиса для образца №3, измеренная при  $T=300 \text{ K}$ ; в) петля гистерезиса для образца №4, измеренная при  $T=300 \text{ K}$ ; 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.

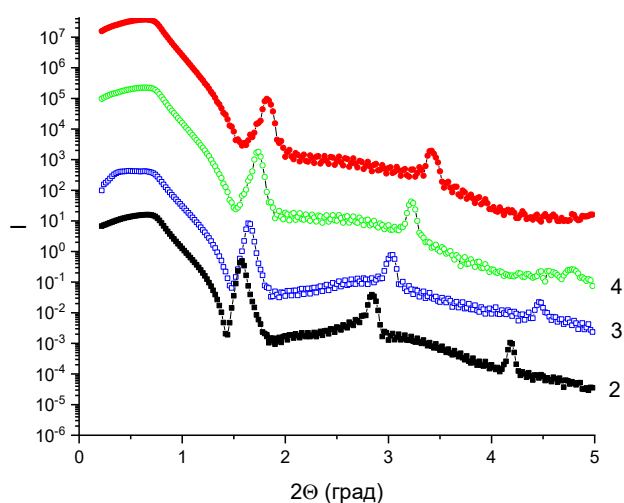


Рисунок 2.1.8.2. Экспериментальные рефлектометрические кривые для образцов №2 - №5.

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 В<sub>4</sub>С). ФАЙЛ: [Прил. ПГ\\_2.1.8\\_Научный отчет \(Синтез, структурная и магнитная характеристика тонких пленок и планарных наноструктур на основе дора В<sub>4</sub>С\).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  $10 \text{ \AA}$ .

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  $^{157}\text{Gd}$  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  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . 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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Nb(250 Å /Gd(10 Å)/Nb(250 Å)/ TaCu(50 Å)
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr(5.8 Å)/Gd(50 Å)/Cr(5.8 Å)] <sub>12</sub> /Cr(30 Å)
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr 7.2 Å)/Gd(50 Å)/Cr(7.2 Å)] <sub>12</sub> /Cr(30 Å)
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr(10 Å)/Gd(50 Å)/Cr(10 Å)] <sub>12</sub> /Cr(30 Å)
5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr(20 Å)/Gd(50 Å)/Cr(20 Å)] <sub>12</sub> /Cr(30 Å)
6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr(60 Å)/Gd(50 Å)/Cr(60 Å)] <sub>12</sub> /Cr(30 Å)
7	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Cr(50 Å)/[Fe(35 Å)/Cr(8.6 Å)/Gd(50 Å)/Cr(8.6 Å)] <sub>12</sub> /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 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 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.

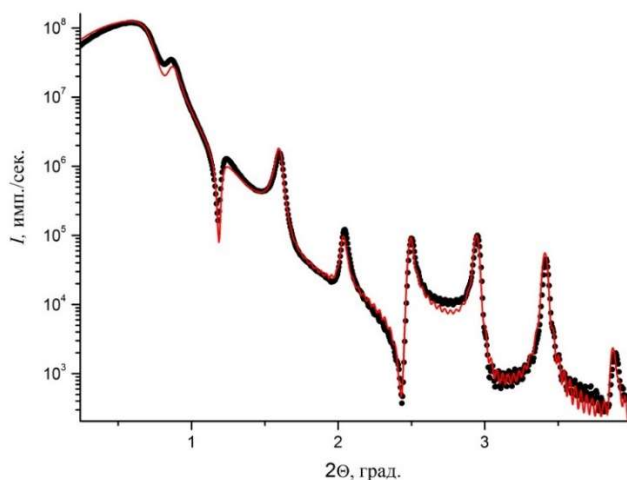


Рисунок 2.1.9.1. Экспериментальные данные (символы) и результат обработки (линия) рентгеновской рефлектометрии для сверхрешетки Fe/Cr(60 Å)/Gd (образец № 6).

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  $\sigma$  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 2.1.9.2 представлены температурные зависимости намагниченности для образцов № 5 и 6.

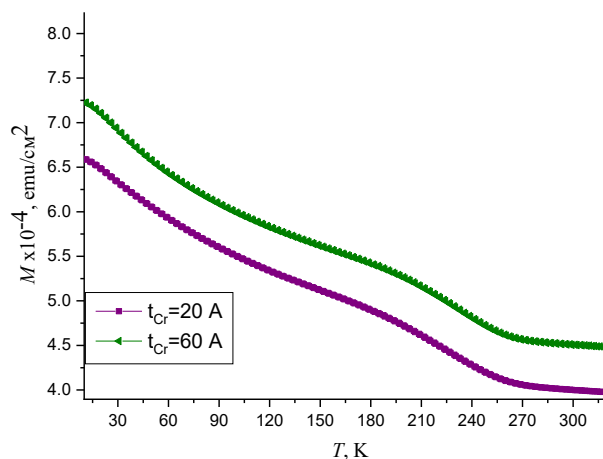


Рисунок 2.1.9.2. Зависимости намагниченности от температуры для образцов № 5 – 6: Fe/Cr(20 Å)/Gd, Fe/Cr(60 Å)/Gd, измеренные при H=500 Э.

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  $t_{Cr} > 8.6$  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 переворота спина ( $R^{++}$  и  $R^{--}$ ) и две с переворотом 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  $M_H = 4.9 \mu_B/\text{атом}$  и  $M_B = 6 \mu_B/\text{атом}$ , в центральной части  $M_0 = 3 \mu_B/\text{атом}$ . Магнитный момент в слое Fe во всем диапазоне температур равен  $2.1 \mu_B/\text{атом}$  и ориентирован по



направлению внешнего магнитного поля. Угол поворота магнитного момента Gd в интерфейсных подслоях равен  $50^\circ$ , в центральном подслое  $\sim 132^\circ$ .

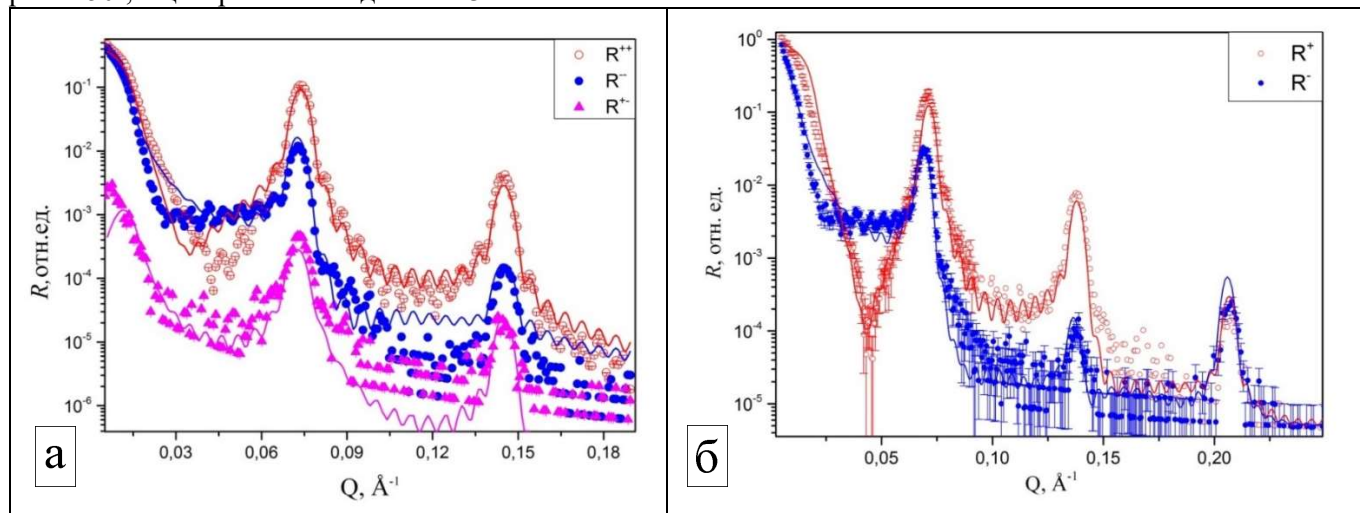


Рисунок 2.1.9.3. Результаты нейтронной рефлектометрии: а) зависимость коэффициента отражения нейтронов, поляризованных в направлении магнитного поля ( $R^{++}$ ), противоположно направлению магнитного поля ( $R^{-}$ ) и со спин-флипом ( $R^{+-}$ ) от переданного импульса для структуры Fe/Cr(5.8 Å)/Gd 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  $\tau$  описывает скорость изменения величины магнитного момента с глубиной внутри слоя. Данная зависимость приведена на Рисунке 2.1.9.4.

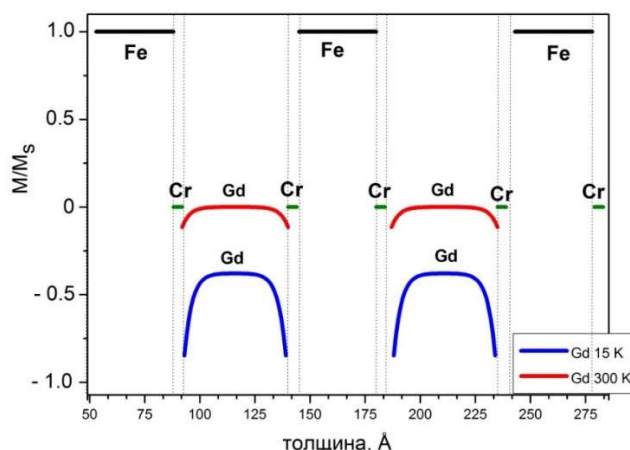


Рисунок 2.1.9.4. Зависимость относительной величины среднего магнитного момента Fe, Cr и Gd в сверхрешетке Fe/Cr(7.2 Å)/Gd от толщины слоёв в магнитном поле  $H=500$  Э при  $T=15$  и 300 К.

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  $\mu_B$  в интерфейсных областях,

и магнитные моменты развернуты так, что угол между магнитным полем и моментом составляет 15 - 20 градусов. Магнитный момент Fe равен  $2.1 \mu_B/\text{атом}$ . Все расчетные значения углов и магнитных моментов приведены в таблице 2.1.9.2.

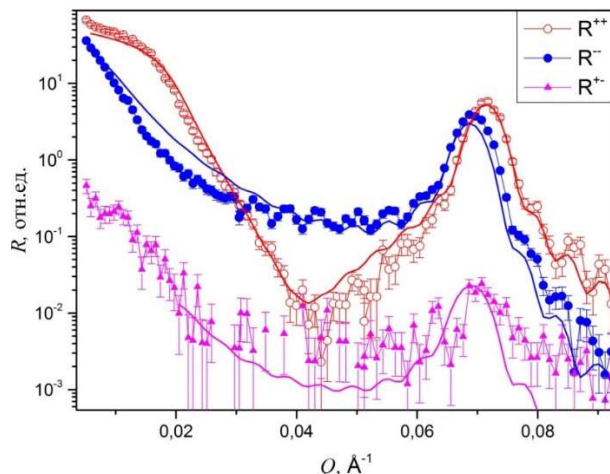


Рисунок 2.1.9.5. Зависимость коэффициента отражения нейтронов, поляризованных в направлении магнитного поля ( $R^{++}$ ) и противоположно направлению магнитного поля ( $R^-$ ) и со спин-флипом ( $R^+$ ) от переданного импульса для структуры Fe/Cr(7.2 Å)/Gd при температуре 15 К и  $H=4\text{кЭ}$ .

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.

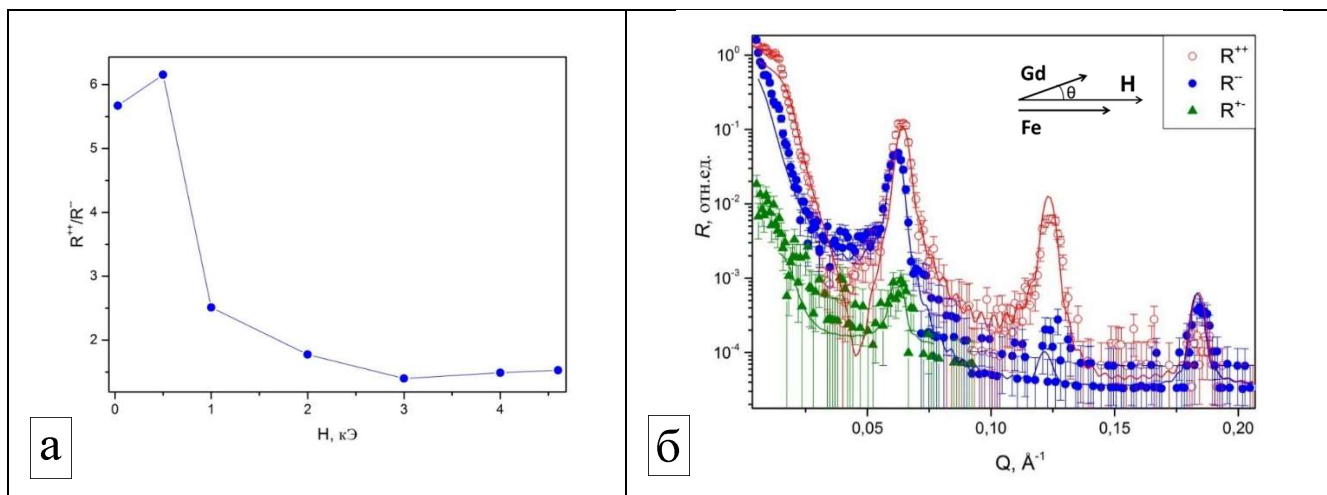


Рисунок 2.1.9.6. а) зависимость отношения интегральных значений коэффициентов отражения  $R^{++}/R^-$  первых брэгговских пиков от внешнего магнитного поля для структуры Fe/Cr(7.2 Å)/Gd при температуре 15К; б) зависимость коэффициента отражения нейтронов, поляризованных в направлении магнитного поля ( $R^{++}$ ) 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 <sub>в</sub>	M <sub>о</sub>	M <sub>н</sub>	θ <sub>в</sub>	θ <sub>о</sub>	θ <sub>н</sub>
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.

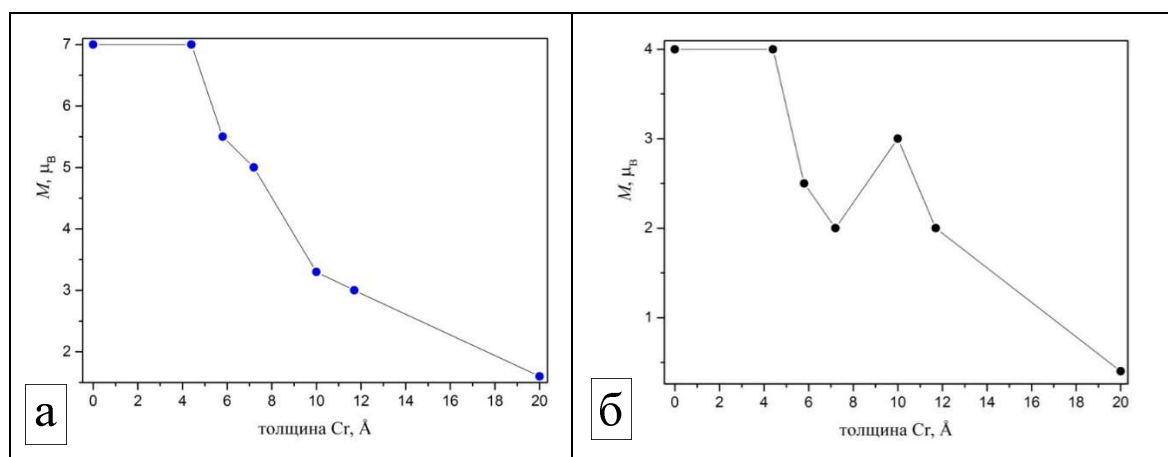


Рисунок 2.1.9.7. а) зависимость среднего значения магнитного момента Gd в интерфейсных подслоях (в расчете на атом) от толщины прослойки Cr при  $T=15$  К и  $H=500$  Э; б) зависимость среднего значения магнитного момента Gd в центральном подслое (в расчете на атом) от толщины прослойки Cr при  $T=15$  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  $10 \text{ \AA}$ . 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  $4 \text{ \AA}$  между слоями Fe и Gd приводит к существенному уменьшению межслойного обменного взаимодействия. В структурах Fe/Cr/Gd с толщиной прослойки Cr более  $10 \text{ \AA}$  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  $1 \text{ нм}$ , помещенной в резонаторную структуру, состоящую из  $50 \text{ нм}$  слоя ниобия на сапфировой подложке и покрытой  $10 \text{ нм}$  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  $61.2 \text{ мм}$  и длину  $87.3 \text{ мм}$ . Для гамма-излучения с энергией  $1.33 \text{ МэВ}$  эффективность регистрации составляет  $45 \%$ , а разрешение по энергии  $2 \text{ кэВ}$ . Гамма-детектор был размещен на расстоянии  $3 \text{ см}$  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  $182 \text{ кэВ}$  (красные точки) как функция  $k_z$ . Нейтронная кривая характеризуется ПВО с критическим вектором  $k_{\text{crit}}=0.09 \text{ нм}^{-1}$ , осцилляциями Кизиха выше  $k_{\text{crit}}$ , а также провалом ниже  $k_{\text{crit}}$  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.

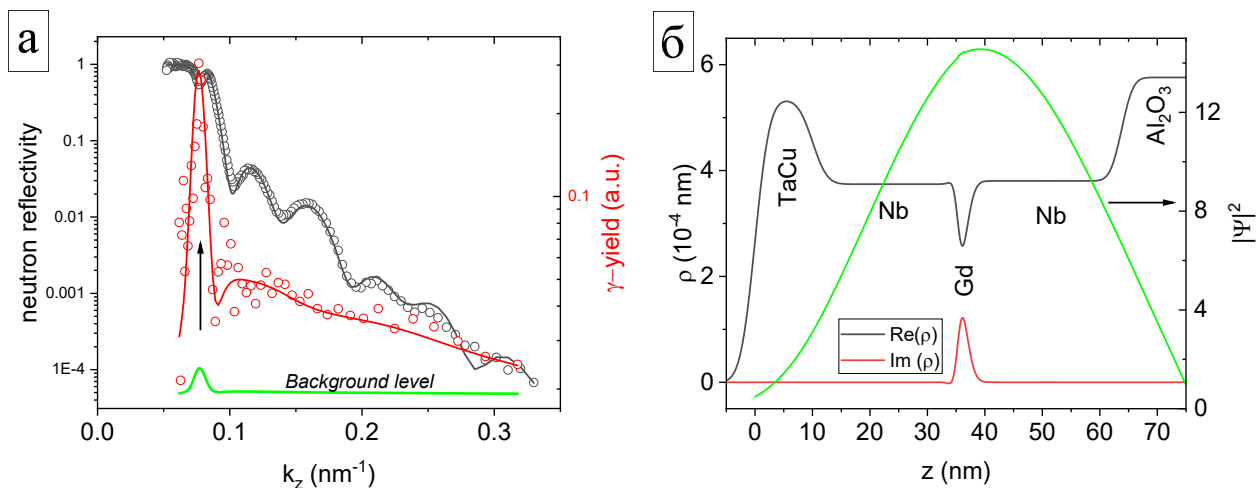


Рисунок 2.1.9.8. а) экспериментальные данные (точки) и расчет (сплошные линии) коэффициента нейтронного отражения и гамма-рассеяния для образца №1. Положение волноводного резонанса показано вертикальной стрелкой; б) реальная и мнимая часть ПДР полученная в результате фита. ПДР для гадолиния рассчитывался 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 варьировалась 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  $10\text{\AA}$ . 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  $4\text{\AA}$  между слоями Fe и Gd приводит к существенному уменьшению межслойного обменного взаимодействия. В структурах Fe/Cr/Gd с толщиной прослойки Cr более  $10\text{\AA}$  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 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  $^{157}\text{Gd}$  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 мм<sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2x2 мм<sup>2</sup> 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 200x200 мм<sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2x2 мм<sup>2</sup> с поканальной регистрацией сигнала. Цель выполнения работы: разработать ЭКД на двумерную позиционно-чувствительную многопроволочную камеру апертурой не менее 200x200 мм<sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2x2 мм<sup>2</sup> 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 200x200мм<sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2x2 мм<sup>2</sup> 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 мм<sup>2</sup>, пространственным разрешением не хуже 1.5x1.5x0.05 мм<sup>3</sup>. (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 100x100 мм<sup>2</sup>, пространственным разрешением не хуже 1.5x1.5x0.05 мм<sup>3</sup>. Цель выполнения работы: разработать КД на регистрирующий газоразрядный модуль с твердотельным конвертером с активной площадью не менее 100x100 мм<sup>2</sup>, пространственным разрешением не хуже 1.5x1.5x0.05 мм<sup>3</sup>. 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 100x100 мм<sup>2</sup>, пространственным разрешением не хуже 1.5x1.5x0.05 мм<sup>3</sup>. 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 мм<sup>2</sup>. (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 мм<sup>2</sup>. 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 мм<sup>2</sup>. 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 мм<sup>2</sup>. 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 мм<sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2x2 мм<sup>2</sup> 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 мм<sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2×2мм<sup>2</sup> с поканальной регистрацией сигнала. Цель выполнения работы: разработать

КД на двумерную позиционно-чувствительную многопроволочную камеру апertureй 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 апertureй 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 апertureй 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 апertureй 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 апertureй 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.

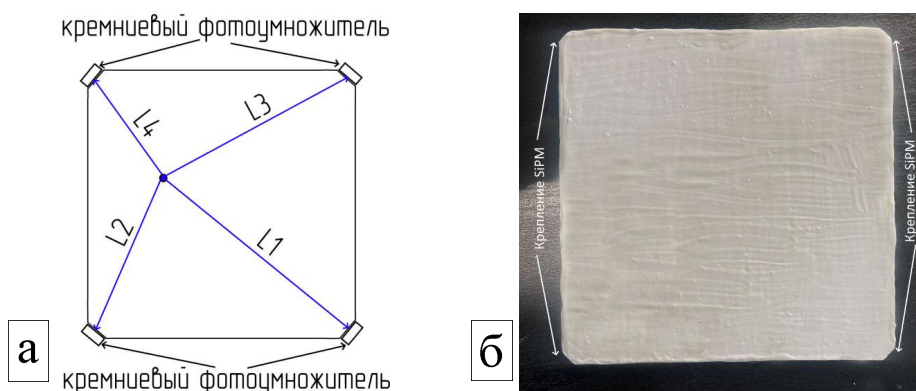


Рисунок 2.1.15.1. Прототип двумерного ПЧС. а) Принцип работы двумерного ПЧС; б) активная область прототипа 2Д-ПЧС

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.

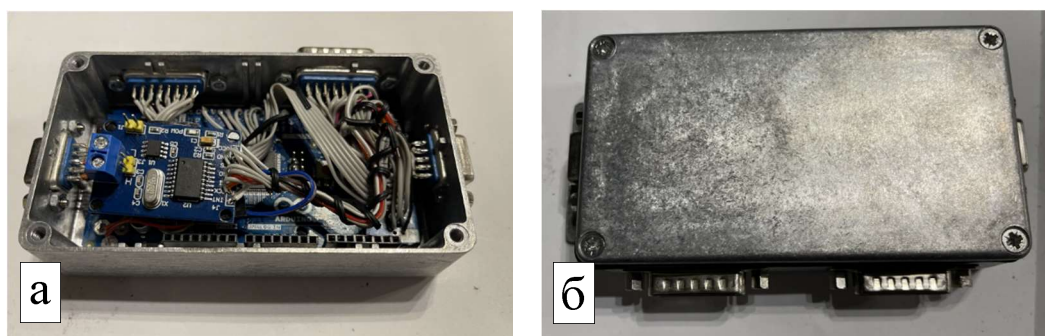


Рисунок 2.1.16.1. Внешний вид контроллера управления

Контроллер изготовлен на основе микроконтроллера ATMEGA2560 и содержит в себе модуль интерфейса CANBUS. Принципиальная схема контроллера показана на рисунке 2.1.16.2.

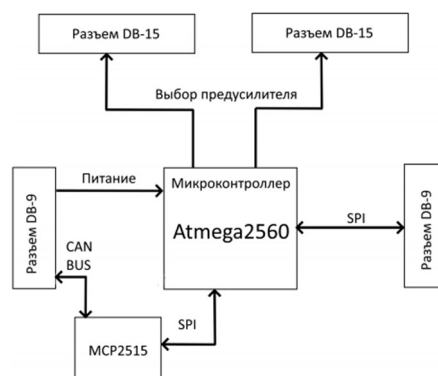


Рисунок 2.1.16.2. Принципиальная схема

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 порогоми 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).

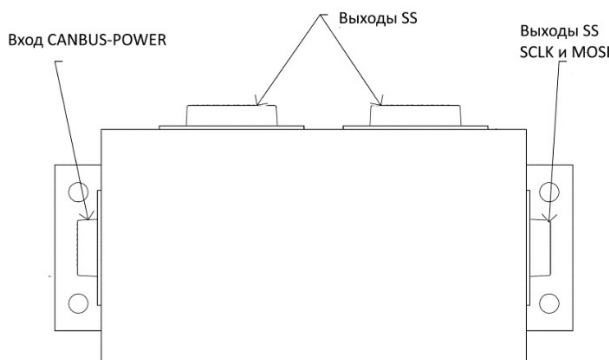


Рисунок 2.1.16.3. Описание разъемов

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».



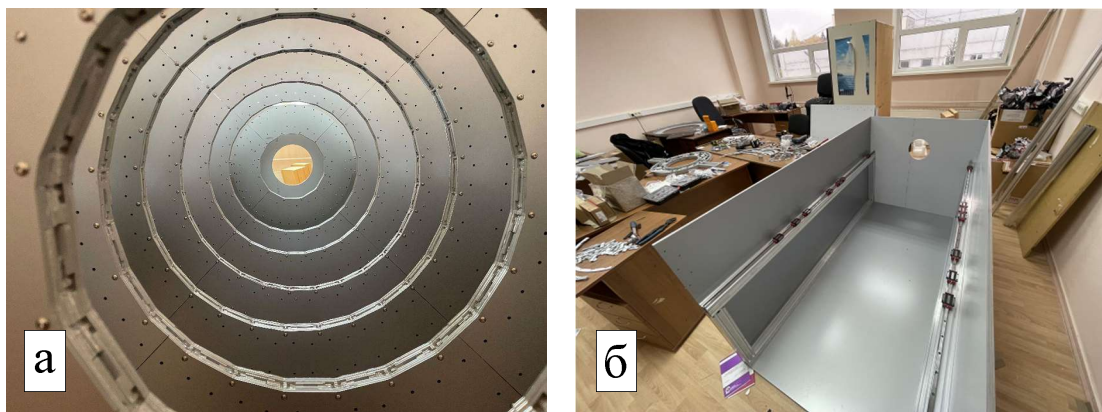


Рисунок 2.1.17.1. Система юстировки детекторной системы дифрактометра «СФЕРА». а) Внешний вид внутренних колец; б) внешний вид системы юстировки детекторной системы

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.

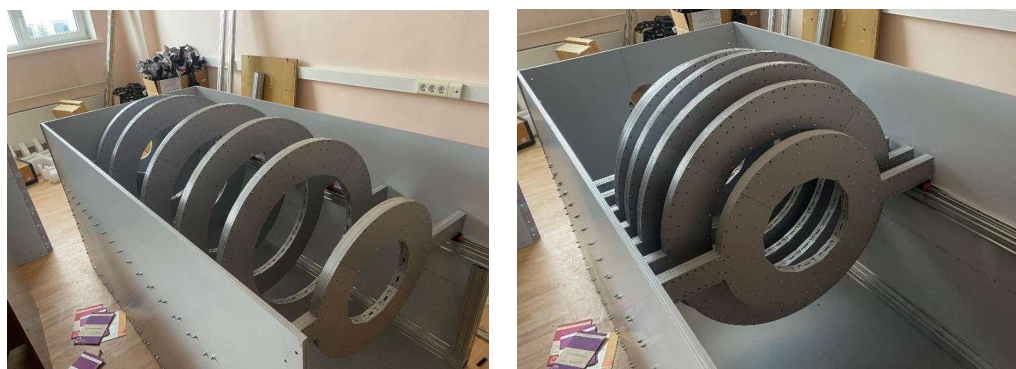


Рисунок 2.1.17.2. Внешний вид колец детектора размещённых в различных конфигурациях

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 вырезанного 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.

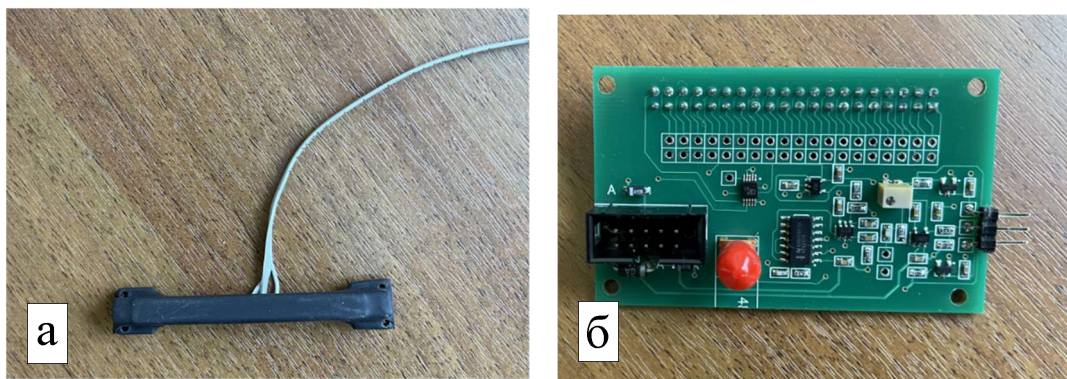


Рисунок 2.1.18.2. а) Внешний вид одиночного детектора с креплением; б) внешний вид предусилителя

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.

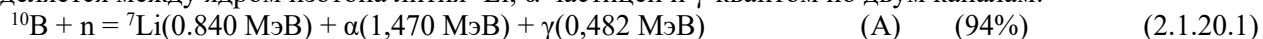
**Разработка технологии нанесения покрытий на основе карбида бора  $B_4C$  на алюминиевые пластины толщиной 0,5 мм для дальнейшего использования в качестве конвертера нейтронного излучения в детекторах на ускорительных и реакторных источниках нейтронов**

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  $^7Li$ ,  $\alpha$ -частицей и  $\gamma$ -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  $^{10}\text{B}$ .

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  $\alpha$ -частицы и 1,7 мкм для  $^7\text{Li}$ . 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  $500^\circ\text{C}$ . 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  $660^\circ\text{C}$ , то эта технология не позволяет выполнять нанесение карбида бора на алюминиевую фольгу.

Новая технология нацелена на получение тонкоплёночных покрытий из карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$ , обогащённого изотопом  $^{10}\text{B}$ , на любых алюминиевых основаниях большой площади, в том числе и на фольге, что возможно при температурах оснований от  $50^\circ\text{C}$  до  $200^\circ\text{C}$ . При температуре  $50^\circ\text{C}$  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  $50^\circ\text{C}$  до  $200^\circ\text{C}$ ;
- 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.

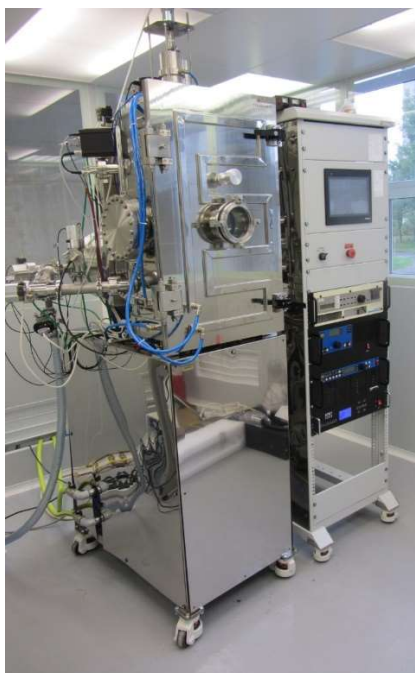


Рисунок 2.1.20.1. Лабораторная вакуумная установка VSR300

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  $250^\circ\text{C}$



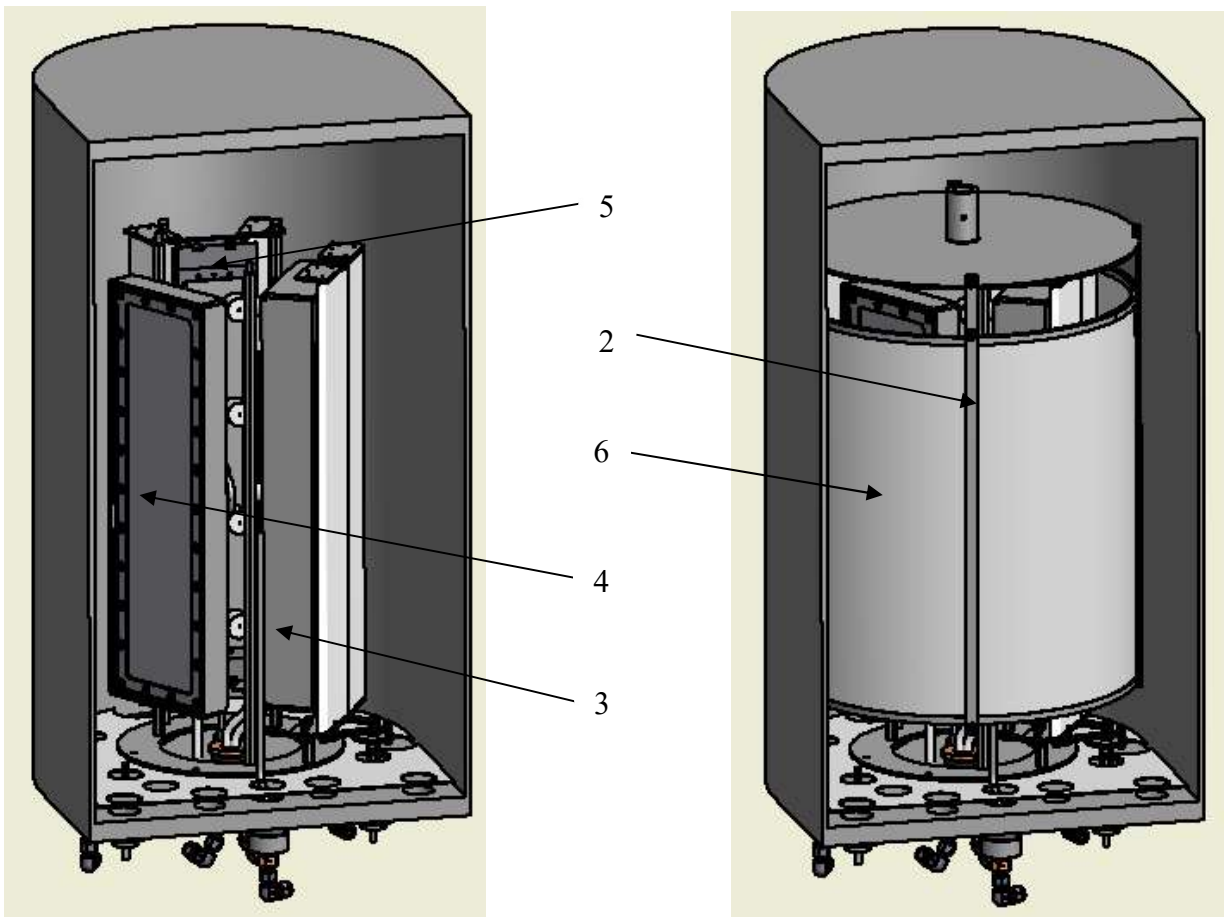


Рисунок 2.1.20.2. Модель реконструкции установки магнетронного напыления

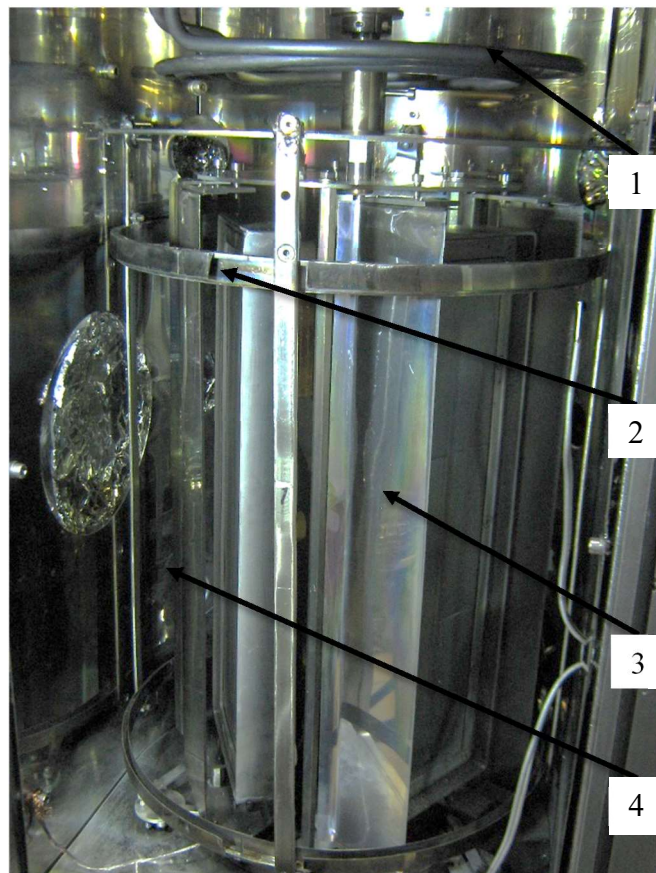


Рисунок 2.1.20.3. Конструкция камеры VSR-300.

Результаты получаемых покрытий описаны в работе «Формирование тонких плёнок карбида бора, обогащённого изотопом  $^{10}\text{B}$ , 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).

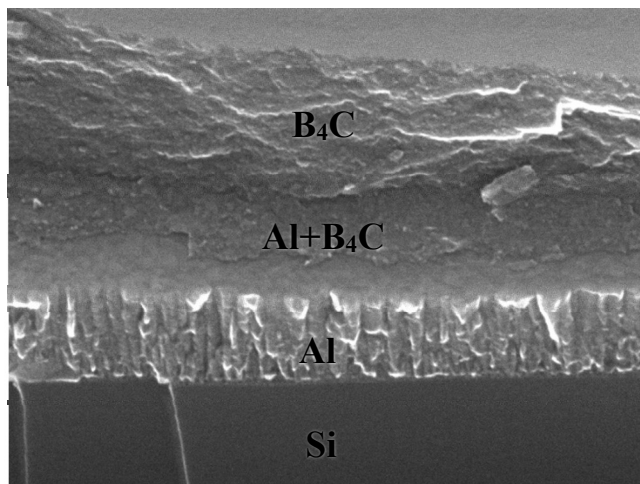


Рисунок 2.1.20.4. Структура плёнки, выращенной магнетронным напылением.

На рис. 2.1.20.4 приведена структура плёнки, выращенной при  $50^\circ\text{C}$  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.

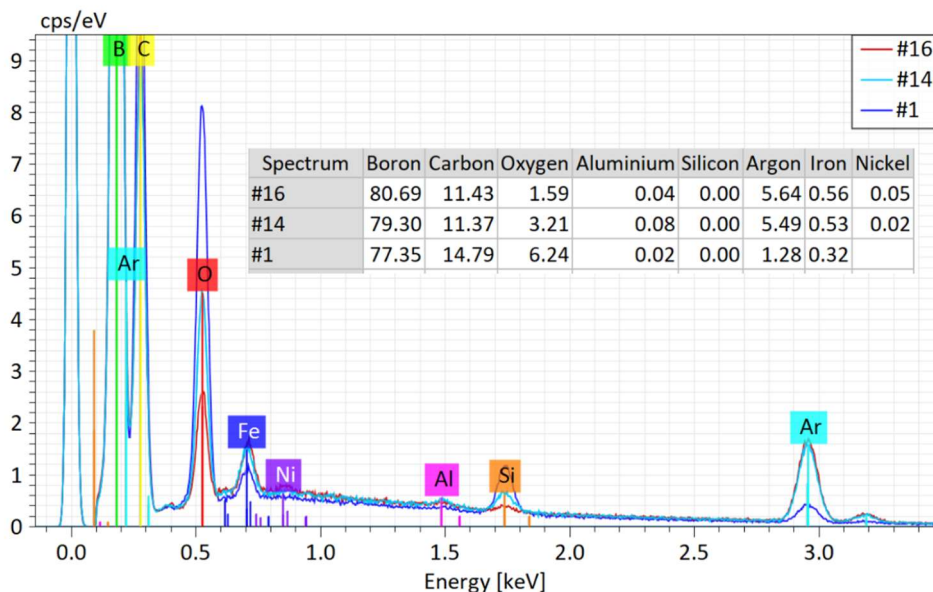


Рисунок 2.1.20.5. Энергодисперсионный рентгеновский спектр образцов плёнок

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  $200^\circ\text{C}$  с ионным ассистированием, №16 при температуре  $50^\circ\text{C}$  с ионным ассистированием. Увеличение содержания аргона в составе плёнки, выращенной при  $50^\circ\text{C}$  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  $50^\circ\text{C}$ .

С помощью новой технологии получен новый тонкоплёночный функциональный материал на основе  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ . Поверхность плёнки, осаждаемой при температуре  $50^\circ\text{C}$  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  $\text{B}_4\text{C}$  на алюминиевой подложке. В детекторе применялись конвертеры из алюминиевых листов  $200 \times 200$  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  $\text{B}_4\text{C}$  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  $^{10}\text{B}$ .

Большой объём проведённых измерений с газовым детектором медленных нейтронов с твердотельным конвертером  $\text{B}_4\text{C}$  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  $\text{B}_4\text{C}$  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  $\text{B}_4\text{C}$  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  $\text{B}_4\text{C}$  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  $^3\text{He}$ , 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,  $^{155}\text{Gd}$  и  $^{157}\text{Gd}$ , а также изотоп  $^{10}\text{B}$  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  $\text{B}_4\text{C}$ ). 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)]<sub>8</sub>/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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>//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. Тоже 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. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>//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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $5.708 \cdot 10^{-6} \text{ Å}^{-2}$ ), 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).

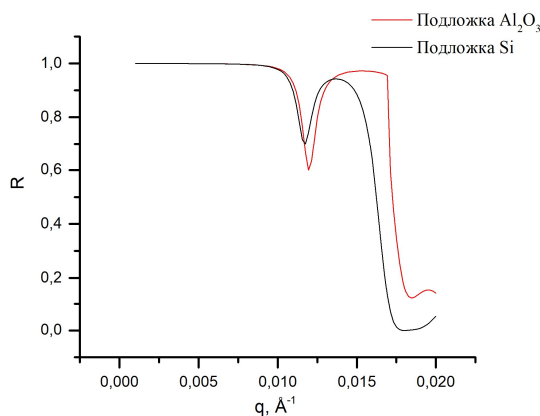


Рисунок 2.1.21.1. Сравнение резонансов в области полного внешнего отражения для одной и той же системы Nb(500 Å)/V(100 Å)/Gd(30 Å)/ V(100 Å)/Nb(500 Å) на различных подложках

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.



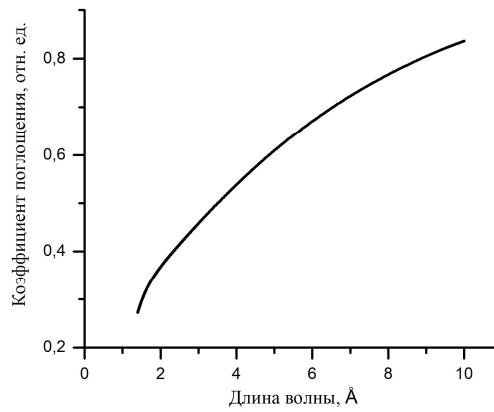


Рисунок 2.1.21.2. Коэффициент поглощения системы  $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{Gd}(5000 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$ , угол падения первичного пучка  $10^\circ$

В случае использования карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$  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  $\text{B}_4\text{C}$  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  $^{10}\text{B}$  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,  $\theta$  – угол падения,  $\lambda$  – 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  $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Gd}(400 \text{ \AA})$ .

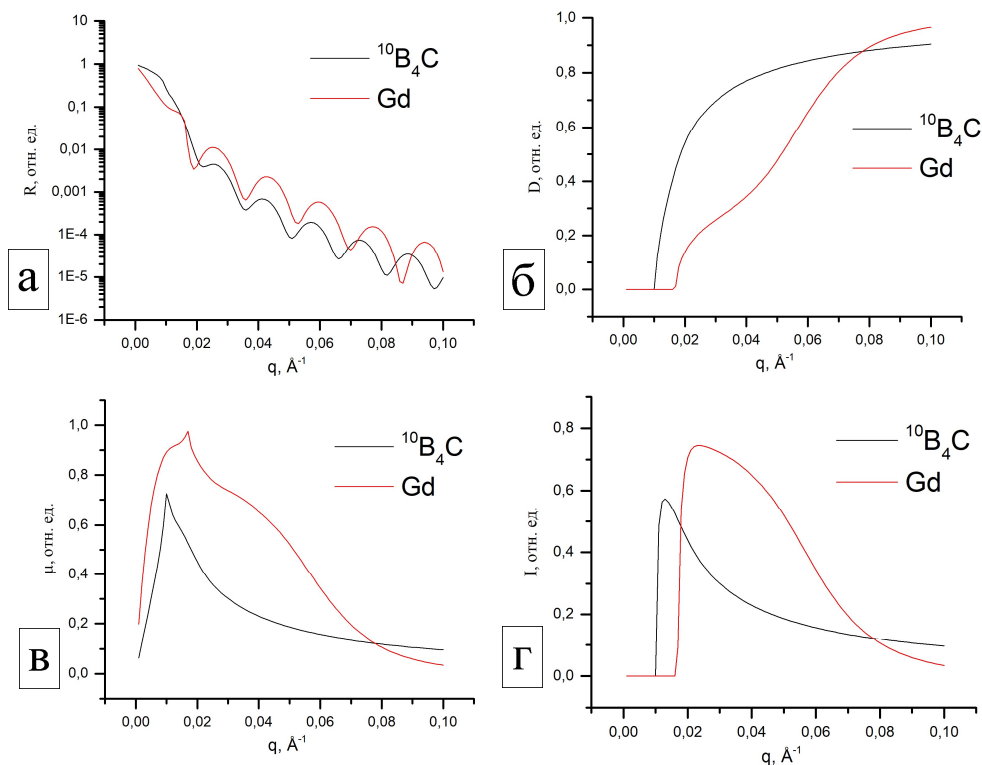


Рисунок 2.1.21.3. Процессы распространения нейтронов в системах с сильнопоглощающими слоями. Пояснения см. в тексте

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.

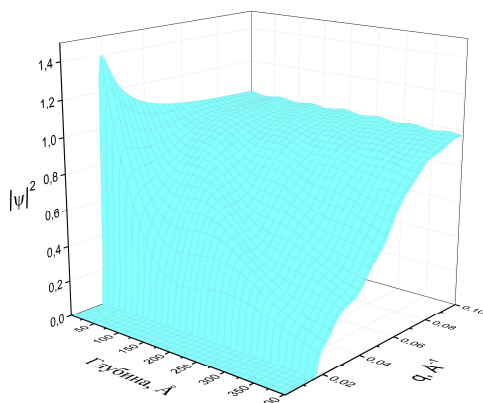


Рисунок 2.1.21.4. Плотность вероятности обнаружения нейтрона  $|\psi(q, z)|^2$  в системе  $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Gd}(400 \text{ \AA})$ . Глубина отсчитывается от поверхности плёнки, на которую падает первичный пучок.

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.

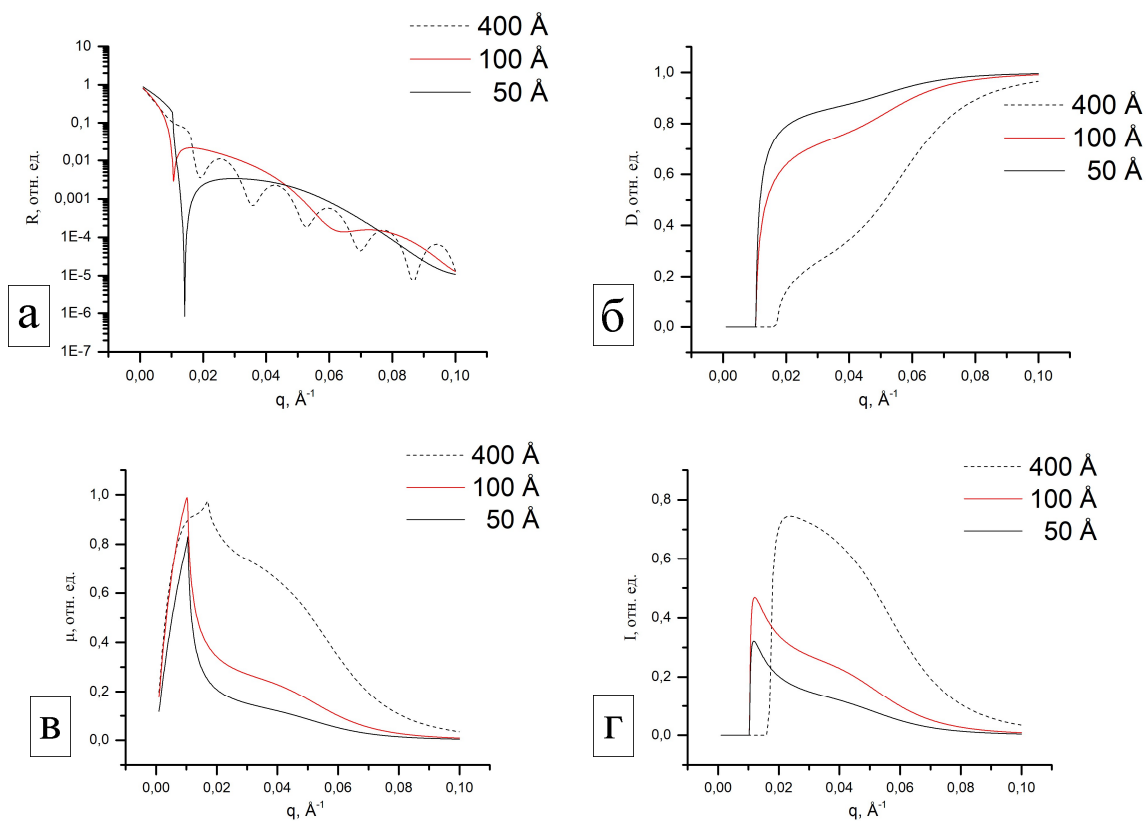


Рисунок 2.1.21.5. Процессы распространения нейтронов в системах  $\text{Si}/\text{Nb}(10 \text{ \AA})/\text{Gd}(100 \text{ \AA})/\text{Nb}(10 \text{ \AA})$  и  $\text{Si}/\text{Cr}(10 \text{ \AA})/\text{Gd}(50 \text{ \AA})/\text{Cr}(10 \text{ \AA})$ . Показаны: отражение (а), прохождение (б), коэффициент 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  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

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.

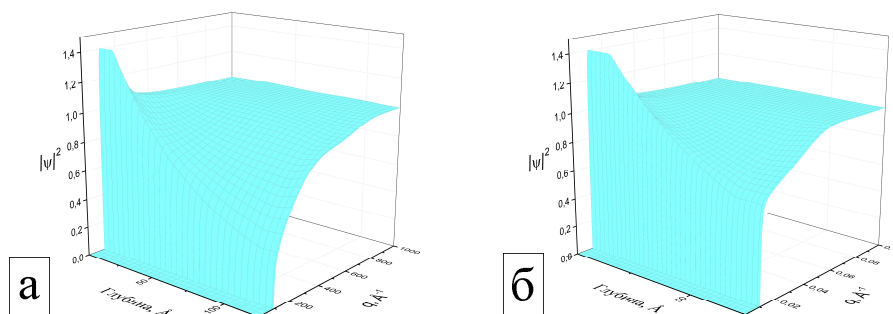


Рисунок 2.1.21.6. Плотность вероятности обнаружения нейтрона  $|\psi(q, z)|^2$  в системах Si//Nb(10 Å)/Gd(100 Å)/Nb(10 Å) (а) и Si//Cr(10 Å)/Gd(50 Å)/Cr(10 Å) (б).

Рассмотрим более сложную систему, содержащую сильнопоглощающий слой – сверхрешётку Si//Cr(100 Å)/[Fe(80 Å)/Cr(10.5 Å)]<sub>8</sub>/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.

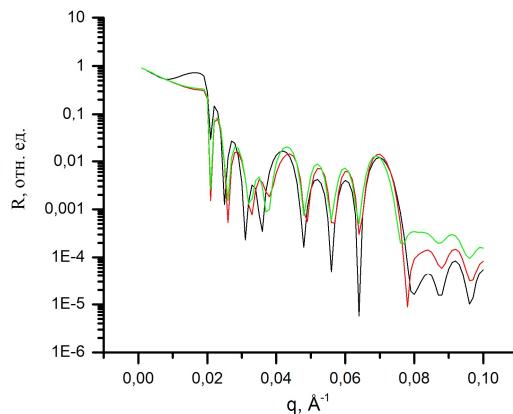


Рисунок 2.1.21.7. Коэффициент отражения для канала рассеяния «++» для углов падения 1 мрад (чёрный), 5 мрад (красный) и 10 мрад (зелёный).

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)]<sub>8</sub>/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.

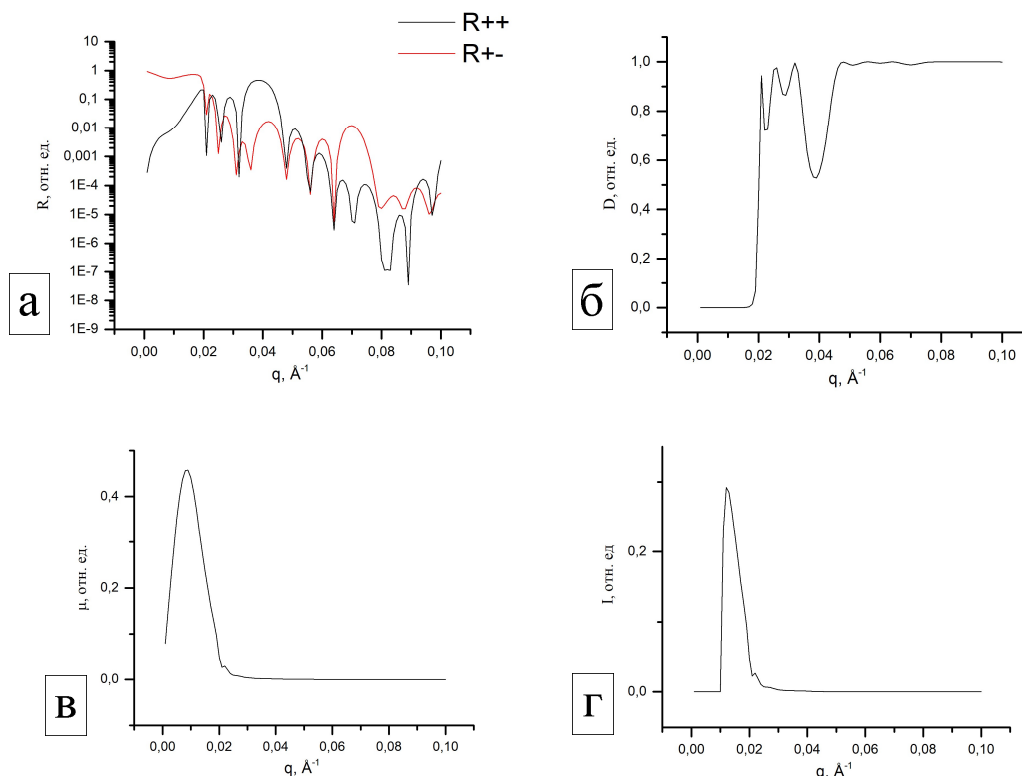


Рисунок 2.1.21.8. Процессы распространения нейтронов в системе Si/Cr(100 Å)/[Fe(80 Å)/Cr(10.5 Å)]<sub>8</sub>/Cr(20 Å)/Gd(50 Å)/V(50 Å). Показаны: отражение (а), прохождение (б), коэффициент поглощения (в), интенсивность вторичного излучения (г)



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  $q$ .

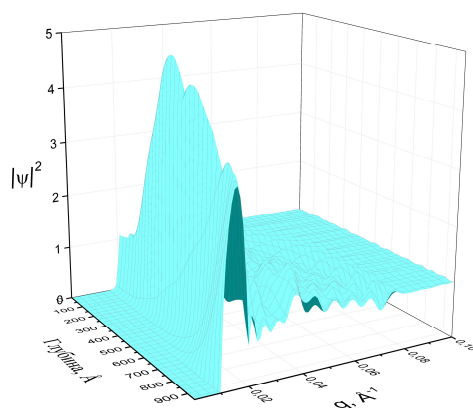


Рисунок 2.1.21.9. Модуль квадрата волновой функции нейтрона в зависимости от глубины и энергии для системы Si//Cr(100 Å)/[Fe(80 Å)/Cr(10.5 Å)]<sub>8</sub>/Cr(20 Å)/Gd(50 Å)/V(50 Å). Отсчёт глубины ведётся от подложки.

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  $^{157}\text{Gd}$ , который обладает наибольшим среди всех ядер сечением поглощения тепловых нейтронов. Реакция взаимодействия нейтронов с изотопом  $^{157}\text{Gd}$  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.

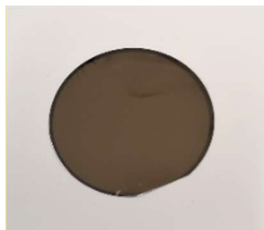


Рисунок 2.1.21.10. Пластина с нанесённым слоем  $^{157}\text{Gd}$  на алюминиевой подложке.

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/см<sup>3</sup>, слой Gd толщиной 1243.75 нм и плотностью 9.47 г/см<sup>3</sup>, слой Nb толщиной 8.1 нм и плотностью 8.57 г/см<sup>3</sup>.

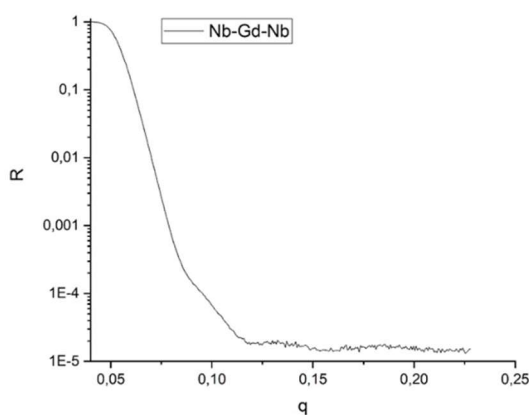


Рисунок 2.1.21.11. Рефлектометрическая кривая Gd.

На HPGe спектрометре Canberra был измерен спектр характеристического гамма-излучения для  $^{157}\text{Gd}$ , Рисунок 2.1.21.12. В процессе измерения конвертер облучался гамма-квантами и нейтронами от источника  $^{252}\text{Cf}$  после замедления в полиэтилене. Для подавления фона, обусловленного гамма-квантами  $^{252}\text{Cf}$ , 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  $^{252}\text{Cf}$  для определения спектра гамма-квантов источника, второе измерение было проведено с пластиной  $^{157}\text{Gd}$ . В силу того, что активность дочерних продуктов распада (ДПР)  $^{252}\text{Cf}$  увеличивается со временем, вычитание результатов первого измерения из результатов второго не позволило полностью подавить пики ДПР  $^{252}\text{Cf}$ . Поэтому регистрация нейтронов по характеристическому гамма-излучению  $^{157}\text{Gd}$  затруднена.

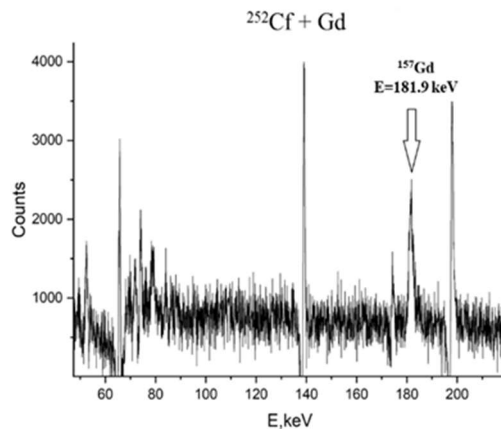


Рисунок 2.1.21.12. Измеренный спектр гамма-квантов для  $^{157}\text{Gd}$ .

Для проведения измерений был использован многопроволочный детектор тепловых нейтронов на основе  $\text{B}_4\text{C}$  (2.1.3 Изготовление и испытания газового детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$  на алюминиевой подложке). В детектор вместо пластины с  $\text{B}_4\text{C}$  поместили пластину с нанесенным слоем  $\text{Gd}$ . 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  $^{157}\text{Gd}$  в газовом промежутке. Продуктами реакции конвертации тепловых нейтронов на  $^{157}\text{Gd}$  являются электроны и гамма-кванты.

Было проведено несколько измерений амплитудного спектра:

- №1 – спектр источника  $^{252}\text{Cf}$  без конвертера  $^{157}\text{Gd}$  в детекторе,
- №2 – спектр без источника  $^{252}\text{Cf}$  с конвертером  $^{157}\text{Gd}$  в детекторе,
- №3 – спектр с источником  $^{252}\text{Cf}$  и с конвертером  $^{157}\text{Gd}$  в детекторе.

При измерениях амплитудных спектров для подавления гамма фона от источника  $^{252}\text{Cf}$  использовался свинцовый фильтр. На Рисунке 2.1.21.13. а) черным цветом показан спектр, полученный при измерении №3, в котором пластина  $\text{Gd}$  облучалась термализованными нейтронами от  $^{252}\text{Cf}$ . Синий спектр — измерение спектра от источника  $^{252}\text{Cf}$  без  $\text{Gd}$ (№1). Розовая гистограмма — измерения  $\text{Gd}$  без источника  $^{252}\text{Cf}$ (№2). На Рисунке 2.1.21.13. б) красная гистограмма — сумма синей и розовой гистограмм.

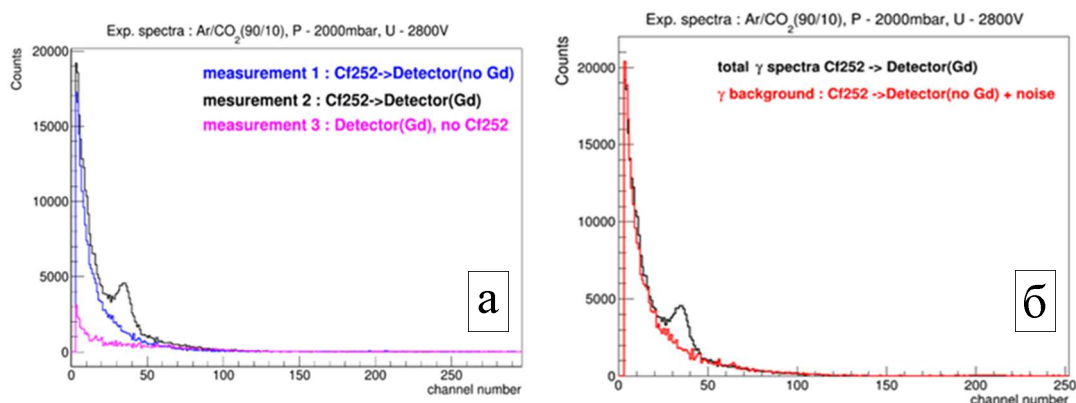


Рисунок 2.1.21.13. Амплитудные спектры а) Черный спектр -  $^{252}\text{Cf} + ^{157}\text{Gd}$ ; Синий спектр -  $^{252}\text{Cf}$  без  $^{157}\text{Gd}$ ; Розовый спектр - измерения  $^{157}\text{Gd}$  без источника  $^{252}\text{Cf}$  и б) красная гистограмма - сумма спектров от источника  $^{252}\text{Cf}$  без  $^{157}\text{Gd}$  и  $^{157}\text{Gd}$  без источника  $^{252}\text{Cf}$ .

Результаты измерений показали, что возможна регистрация нейтронов с конвертером на основе  $^{157}\text{Gd}$ . 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., Храшко 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  $100^\circ\text{C}$ , 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 $\alpha$ -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.



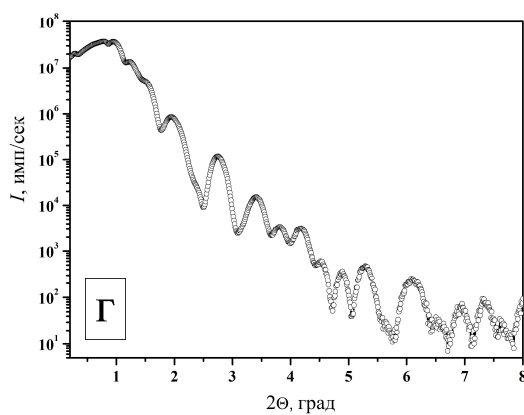
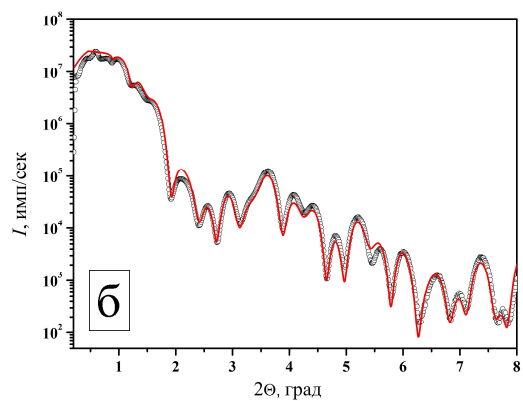
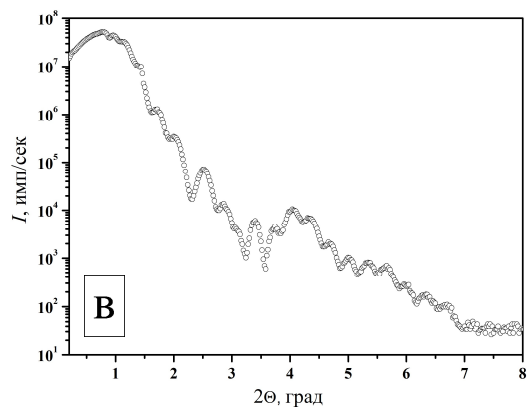
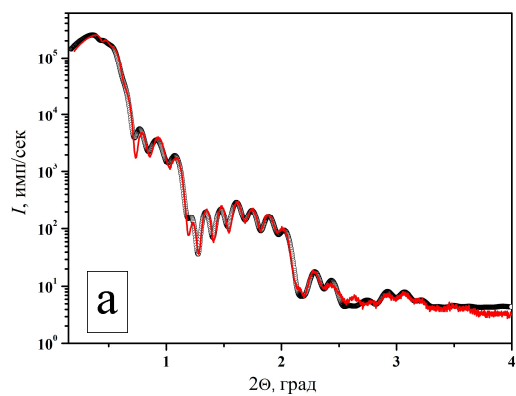


Рисунок 2.1.22.1. а) Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 1 (линия из черных символов) измеренная при излучении  $\text{Cu}$  и модельная кривая (красная линия); б) экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 2, измеренная при излучении  $\text{Cu}$ . Данные находятся в процессе обработки; в) экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 3 (линия из черных символов) измеренная при излучении  $\text{Cu}$  и модельная кривая (красная линия); г) экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 4, измеренная при излучении  $\text{Cu}$ . Данные находятся в процессе обработки.

Образец №	Материал слоя	Толщина слоя, нм	Межслойная шероховатость, нм	Плотность, г/см <sup>3</sup>
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 <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	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 <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	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.

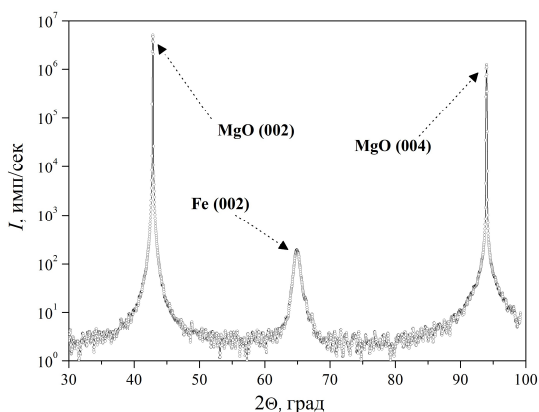


Рисунок 2.1.22.2. Дифрактограмма от образца №1, измеренная вдоль направления роста образца.

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 -  $22^\circ$  для образца № 1 и  $30^\circ$  – 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.

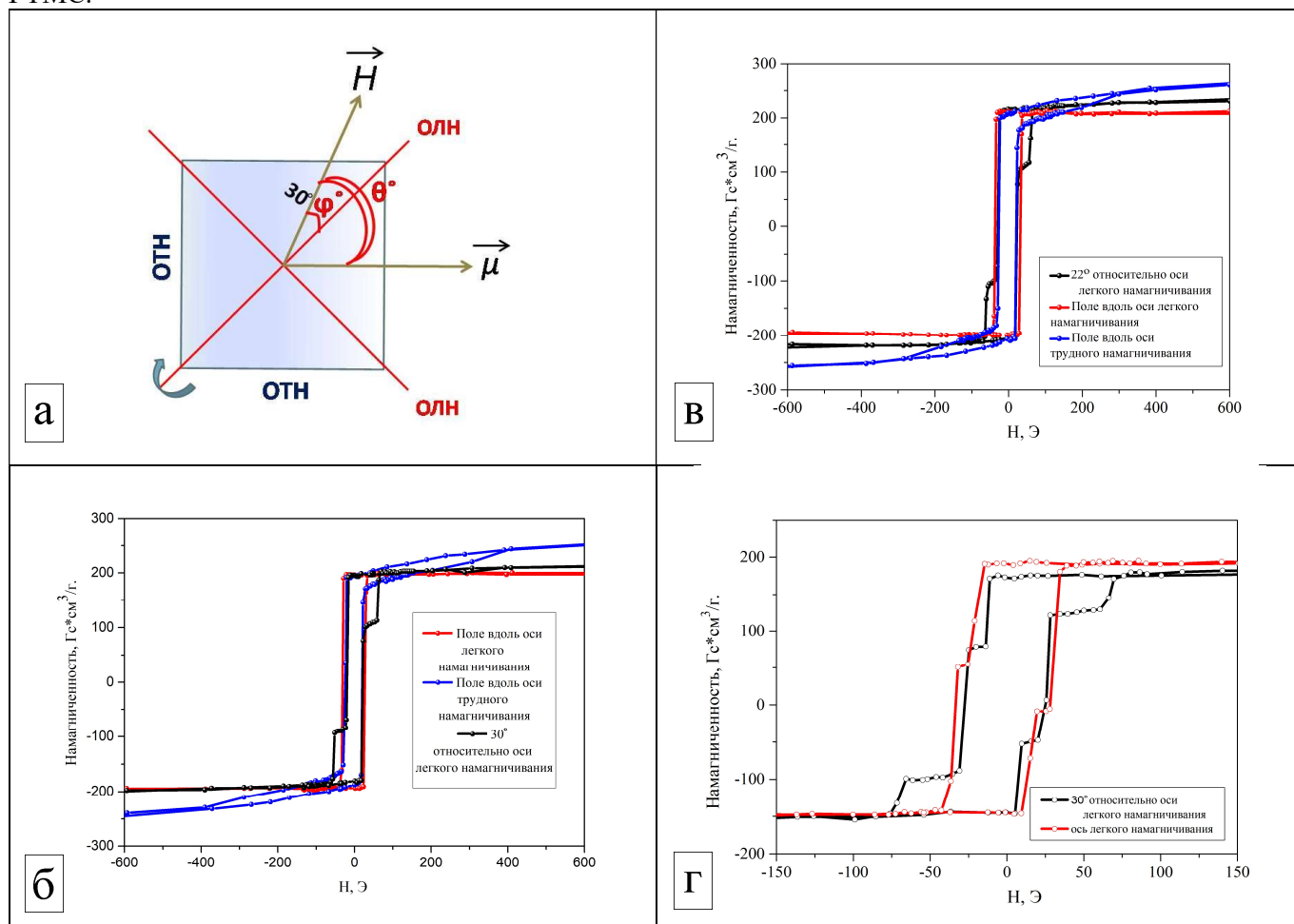


Рисунок 2.1.22.3. а) Схематическая иллюстрация измерения намагниченности. (ОТН и ОЛН ось трудного и легкого намагничивания соответственно) б) петли гистерезиса для образцов №1; в) петли гистерезиса для образцов № 2; г) петли гистерезиса образца № 3, измеренные для ориентаций внешнего магнитного поля относительно оси легкого намагничивания  $[100]\text{Fe}$  при приложении магнитного поля под углом  $30^\circ$  (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 ( $0^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$  и  $90^\circ$  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.

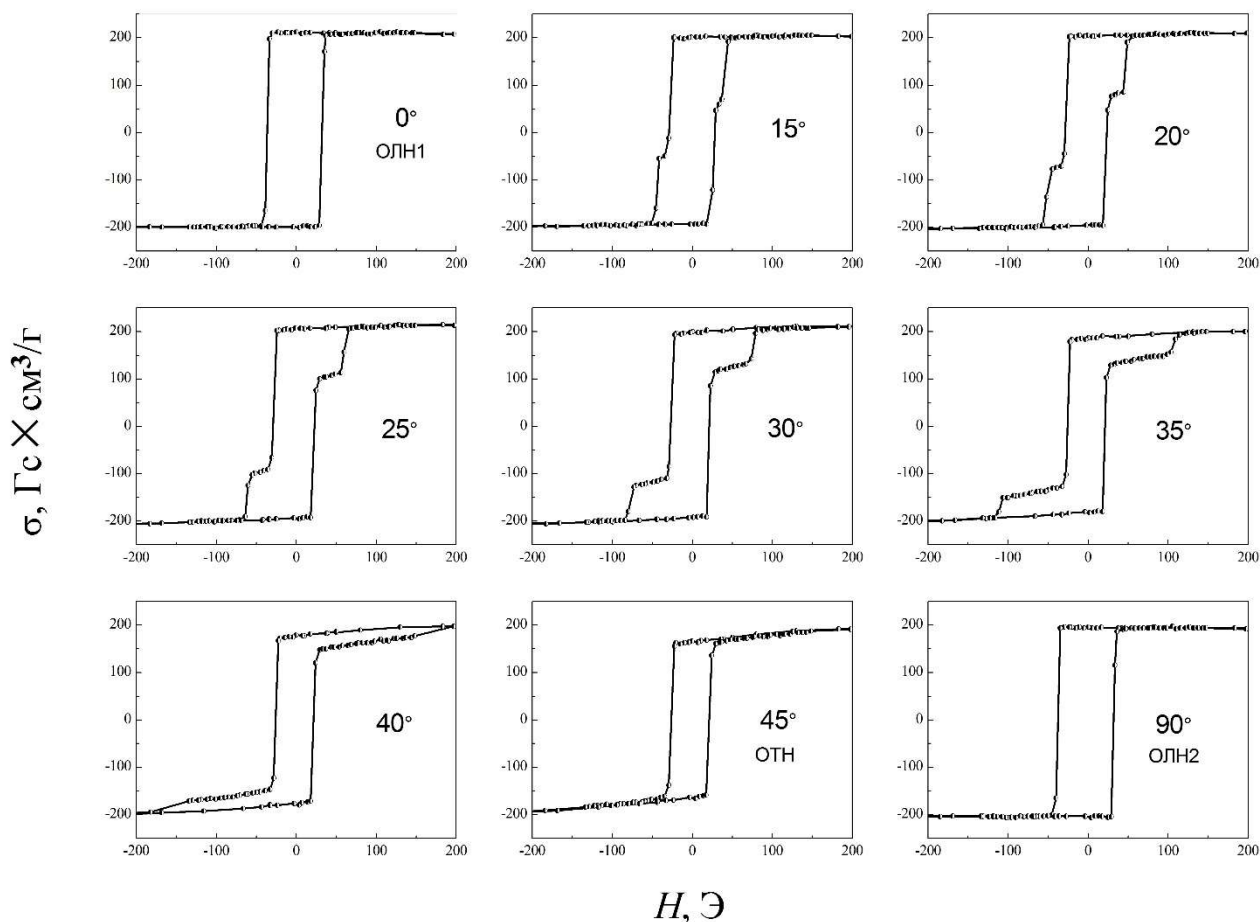


Рисунок 2.1.22.4. Петли гистерезиса для образца № 3, соответствующие различному положению образца относительно направления внешнего магнитного поля.

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 ( $\text{Fe/MgO/Cr/MgO/Fe}$ ) по отношению к образцам № 1 и № 2 ( $\text{Fe/MgO/Fe}$ ). 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  $\text{Fe/MgO/Fe}$  и  $\text{Fe/MgO/Cr/MgO/Fe}$ , 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.

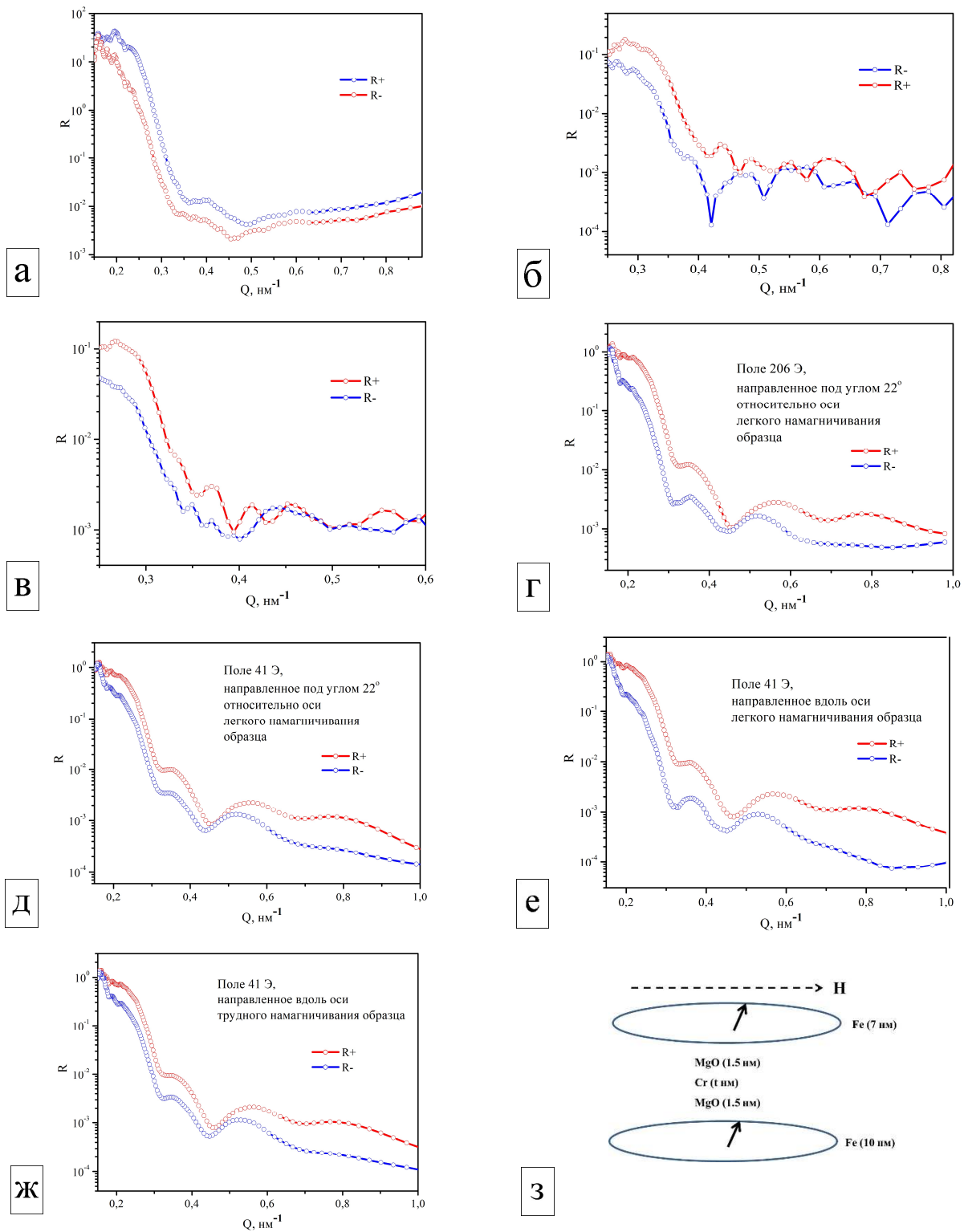


Рисунок 2.1.22.5. а) Коэффициенты отражения поляризованных нейтронов, измеренные в поле  $H = 200$  Э, в зависимости от направления вектора рассеяния в образце №2 под углом  $30^\circ$  относительно оси легкого намагничивания; б) коэффициенты отражения поляризованных нейтронов, измеренные в поле  $H = 45$  Э, в зависимости от направления вектора рассеяния в образце №2 под углом  $30^\circ$  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  $30^\circ$  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  $22^\circ$  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  $22^\circ$  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  $Q_{\text{crit}}$ . 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  $Q_{\text{crit}}$ , 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 ( $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ). Наилучшим образом подходят значения  $\alpha_1 = 54^\circ$  и  $\alpha_2 = 154^\circ$ , чувствительность определения углов около  $5^\circ$ . 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  $Q_{\text{crit}}$ . 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  $Q_{\text{crit}}$  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.

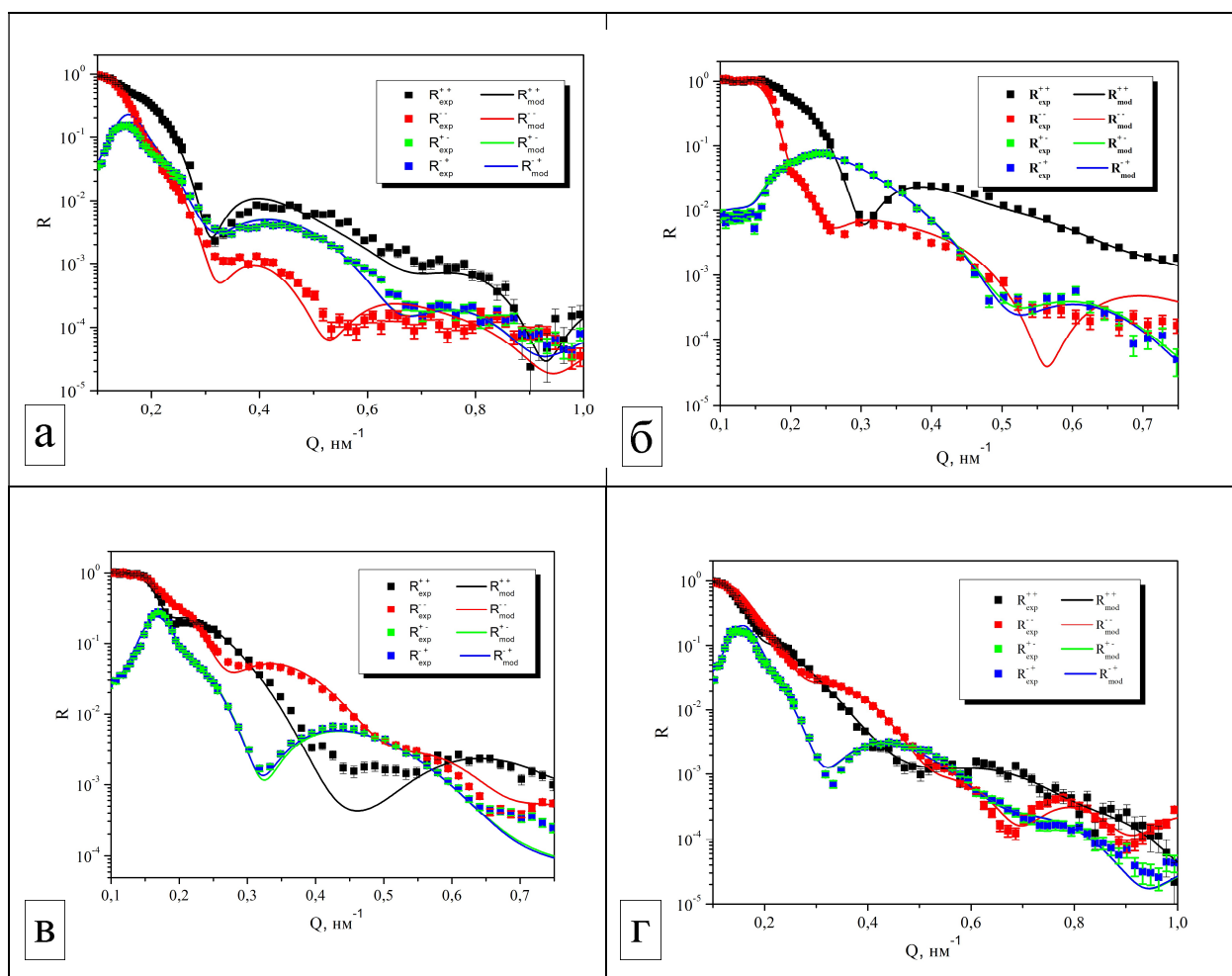


Рисунок 2.1.22.6. а) Экспериментальные кривые рефлектометрии поляризованных нейтронов (символы) и результат подгонки (линии) для образца 3, измеренные в магнитном поле 40 Э; б) Экспериментальные кривые рефлектометрии поляризованных нейтронов (символы) и результат подгонки (линии) для образца 4, измеренные 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. Rühm, B. Toperverg, H. Dosch. Phys. Rev. B 60, 23, 16073 (1999).
- 2.1.22.7. Młynczak 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.

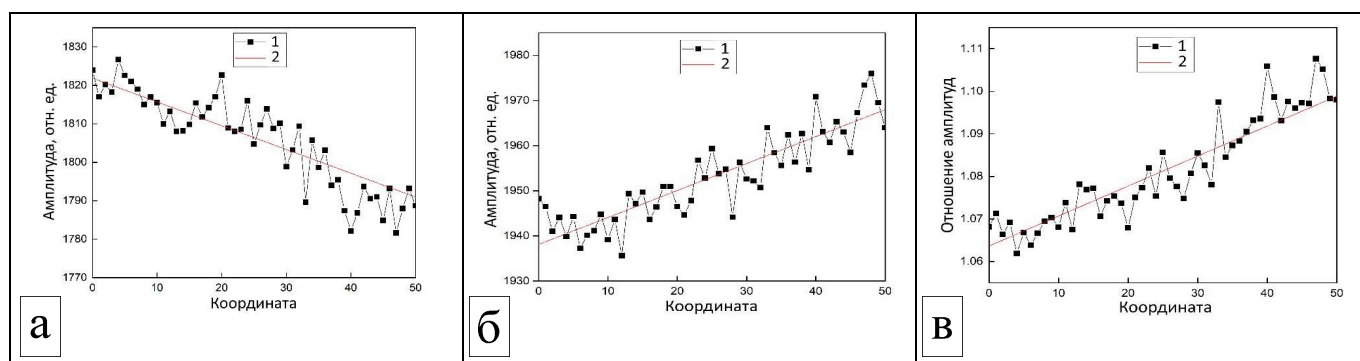


Рисунок 2.1.23.1. Зависимость амплитуды SiPM от координаты: (а) – средняя амплитуда с левого SiPM, (б) – средняя амплитуда с правого SiPM, (в) - отношение амплитуд: 1 – экспериментальные данные, 2 – аппроксимация.

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.

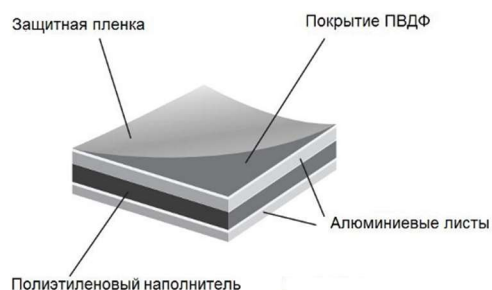


Рисунок 2.1.24.2. Структура алюминиевых панелей

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 100x100 мм<sup>2</sup>. (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 мм<sup>2</sup>. 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 мм<sup>2</sup>.



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 $^{10}\text{B}$ 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  $\text{B}_4\text{C}$  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  $\text{B}_4\text{C}$  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 В<sub>4</sub>С толщиной 1,0 мкм, на катод образца №4 нанесено способом магнетронного напыления покрытие В<sub>4</sub>С толщиной 1,5 мкм, на образец №5 - суспензия бора высокой степени обогащения по изотопу <sup>10</sup>В, плотность покрытия 1 мг/см<sup>2</sup>;

#### 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 В<sub>4</sub>С.

#### 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.

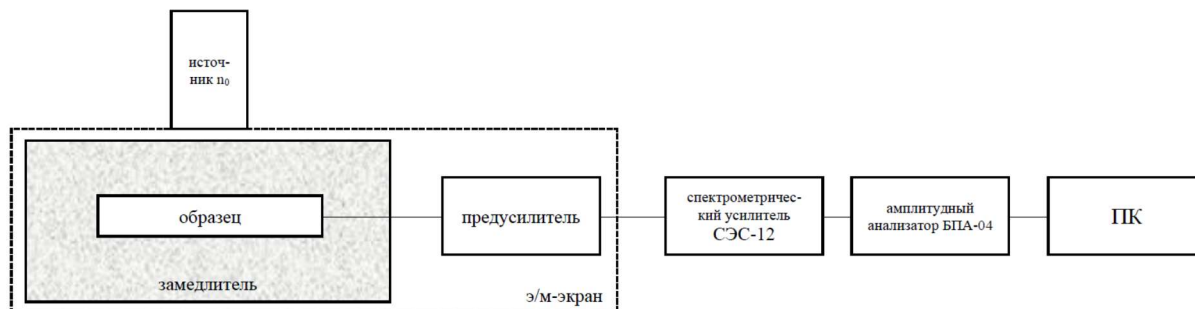


Рисунок 2.1.26.1. Схема экспериментальной установки.

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 <sub>4</sub> С	Магнетронное напыление карбида бора В <sub>4</sub> С	Магнетронное напыление карбида бора В <sub>4</sub> С	Суспензия В
Толщина покрытия, мкм	1,0	1,0	1,5	4,0
Плотность покрытия, мг/см <sup>2</sup>	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

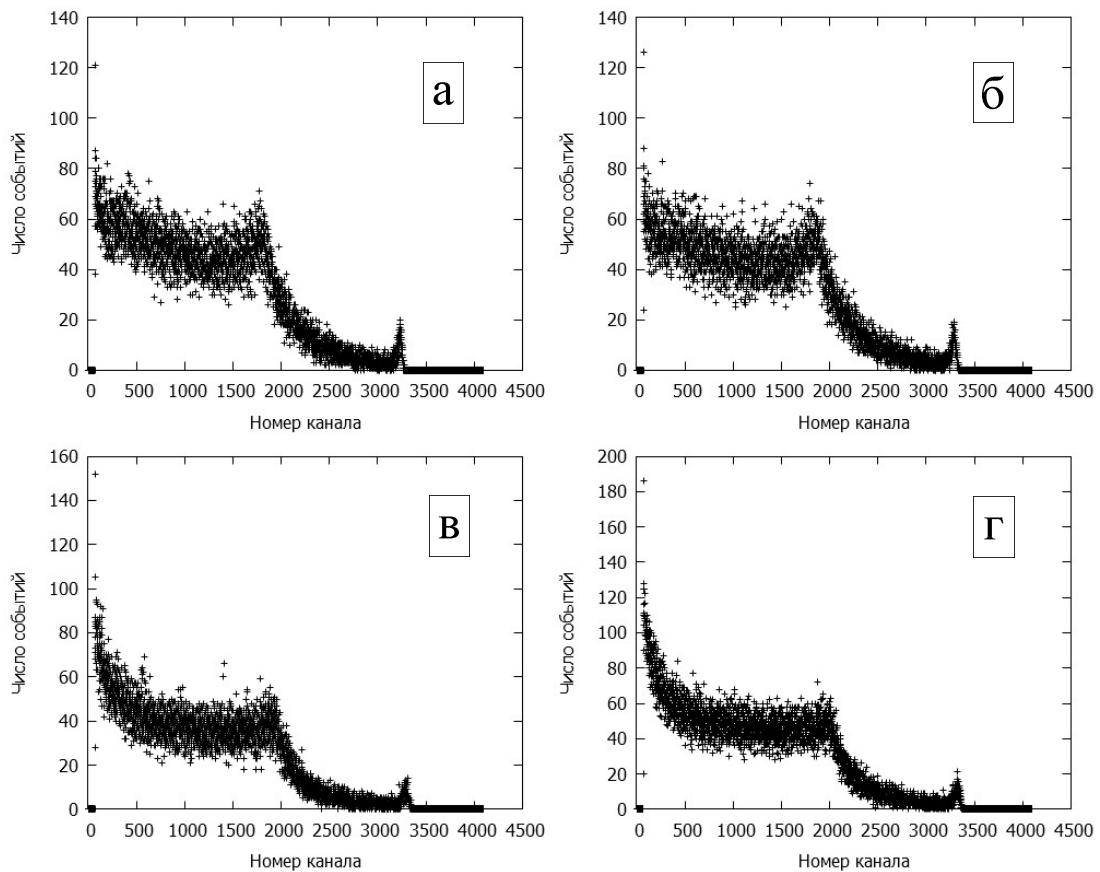


Рисунок 2.1.26.2. Амплитудные спектры пропорциональных счётчиков. а) покрытие В<sub>4</sub>С, образец №1 толщина покрытия 1 мкм; б) покрытие В<sub>4</sub>С, образец №2, толщина покрытия 1 мкм; в) покрытие В<sub>4</sub>С, образец №4, толщина покрытия 1,5 мкм; г) покрытие суспензией В, образец №5, плотность 1 мг/см<sup>2</sup>.

**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  $10^8 \text{ с}^{-1}$ , 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.).

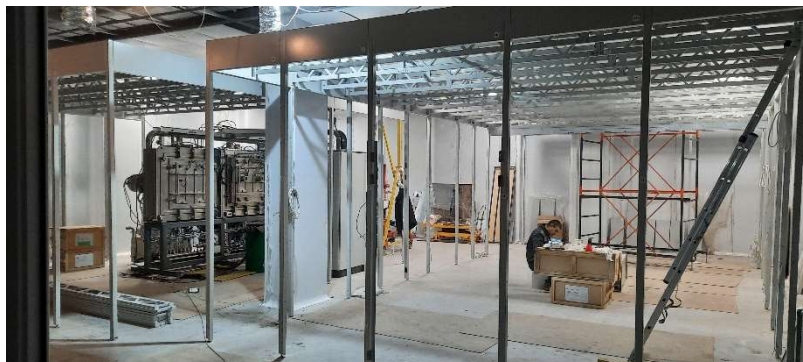


Рисунок 2.2.3.1. Слева – процесс разрушения старых стен и перегородок в процессе подготовки площади для создания ОЭУ. Справа – в подготовленном помещении идет монтаж фильтровентиляционного оборудования чистой зоны. Слева на снимке видна установка вакуумного магнетронного напыления для нанесения пленок 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 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.

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 мм<sup>3</sup> (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.

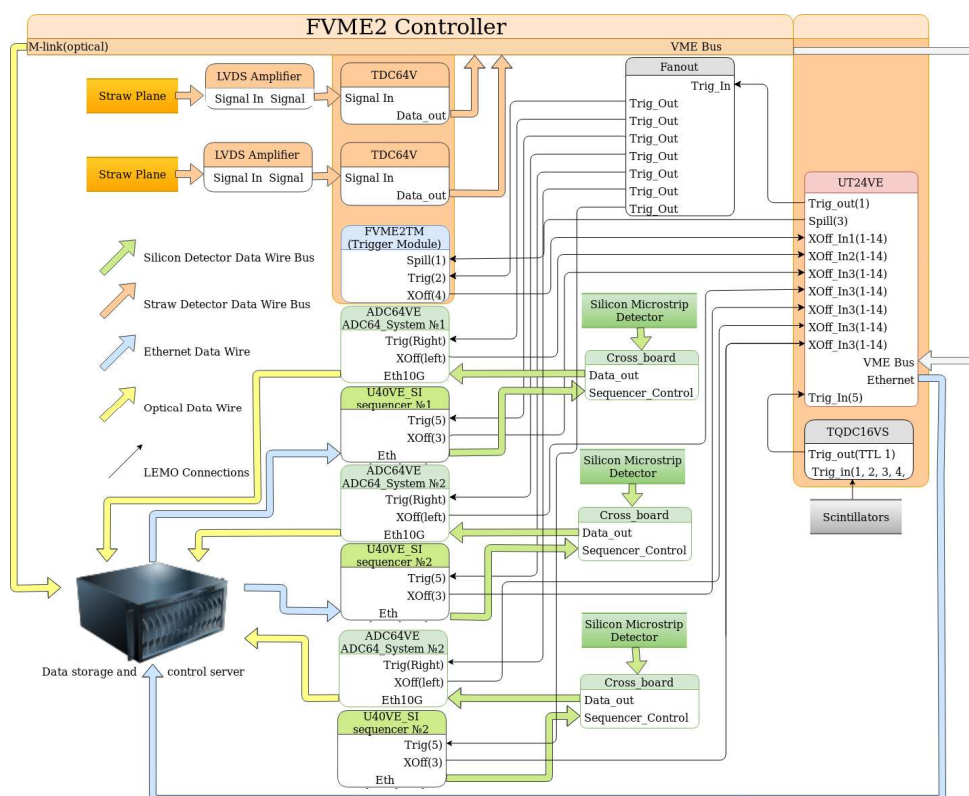


Рисунок 2.3.6.1. Структурная схема системы сбора данных стенда.

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](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;
- Немченко 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: Немченко 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 элементным 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). Элементный 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  $^3\text{He}$ , 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  $^4\text{He}$ , криостат  $^3\text{He}$ , 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.	Роенко 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> <sup>1</sup> , Белушкин А.В. <sup>1,2,3</sup> , Богдзель А.А. <sup>1</sup> , Боднарчук В.И. <sup>1</sup> , Даулбаев О. <sup>1,4</sup> , Дроздов В.А. <sup>1</sup> , Журавлев В.В. <sup>1</sup> , Курилкин А.К. <sup>1</sup> , Куликов С.А. <sup>1</sup> , Литвиненко Е.И. <sup>1</sup> , Петрова М.О. <sup>1</sup> , Подлесный М.М. <sup>1</sup> , Приходько В.И. <sup>1</sup> , Чураков А.В. <sup>1</sup> , Швецов В.Н. <sup>1</sup> . ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В НЭОКС ИБР-2. (очно) <sup>1</sup> Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия <sup>2</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия <sup>3</sup> Институт физики, Казанский федеральный университет, Казань, Россия <sup>4</sup> Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан
10:30-10:50	<u>Кутинова Ольга Васильевна</u> <sup>1,2</sup> , Устинов В.В. <sup>1,2,3</sup> , Афанасьев С.В. <sup>1,2</sup> , Сухов Е.В. <sup>1,2</sup> , Устинов Д.В. <sup>1,2</sup> ПРОТОТИП ВЫСОКО СЕГМЕНТИРОВАННОГО НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ УСТАНОВКИ VM@N (очно) <sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия <sup>2</sup> Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия <sup>3</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
10:50-11:10	<u>Полётов Григорий Владимирович</u> <sup>1</sup> , Суриков К.Н. <sup>1</sup> , Колесников А.Г. <sup>2</sup> , Боднарчук В.И. <sup>2</sup> СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ СЧЕТЧИКОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ (очно) <sup>1</sup> АО «НИИТФА», Москва, Россия <sup>2</sup> ОИЯИ, Дубна, Россия
11:10-11:30	<u>Быстряков Артём Дмитриевич</u> <sup>1,2</sup> , Немченко И.Б. <sup>1,2</sup> , Вагина О.П. <sup>1</sup> , Камнев И.И. <sup>1</sup> , Казарцев С.В. <sup>1</sup> КОМПОЗИЦИОННЫЙ НЕЙТРОННЫЙ ДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ (очно) <sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия <sup>2</sup> 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> <sup>1</sup> , Соловьев А.Г. <sup>1</sup> , Куклин А.И. <sup>2</sup> , Балашою М. <sup>2</sup> , ПРИМЕНЕНИЕ ВЕБ-ТЕХНОЛОГИЙ В ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ. (очно) <sup>1</sup> ЛИТ ОИЯИ, Дубна, Россия <sup>2</sup> ЛНФ ОИЯИ, Дубна, Россия
12:30-12:50	<u>Жукова Алёна Олеговна</u> <sup>1</sup> , Стрекаловский О.В. <sup>1,2</sup>

	<p>ПРОГРАММА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОЦИФРАТОРАМИ САЕН ХХ42 ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРА «КОМЕТА». (очно)  <sup>1</sup> ЛЯР ОИЯИ, Дубна, Россия  <sup>2</sup> 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<sup>1,2</sup>, Боднарчук В.И.<sup>1</sup>, Милков В.М.<sup>1</sup>, Богдзель А.А.<sup>1</sup>, Даулбаев О.<sup>1,3</sup>, Курилкин А. К.<sup>1</sup>          ОБЗОР ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ <sup>6</sup>LiF/ZnS(Ag) ЭКРАНОВ. РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ДЕТЕКТОРА. (онлайн)  <sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, РФ  <sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, РФ  <sup>3</sup> 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<sup>1,2</sup>, Алтынбаев Е.В.<sup>1,2</sup>, Яшина Е.Г.<sup>1,2</sup>, Павлов К.А.<sup>1,2</sup>, Кириенко Ю.М.<sup>1</sup>, Григорьев С.В.<sup>1,2</sup>          МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВОК МУРН НА РЕАКТОРЕ ПИК И РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ ЗА СЧЕТ НЕИДЕАЛЬНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ. (онлайн)  <sup>1</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина  <sup>2</sup> 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 <sup>1,2</sup> НЕМАГНИТНЫЕ КАМЕРЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ НЕЙТРОНОГРАФИИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ. (онлайн) <sup>1</sup> <i>Институт ядерных исследований РАН, Москва, Троицк, Россия.</i> <sup>2</sup> <i>Институт физики высоких давлений РАН, Москва, Троицк, Россия.</i>
17:10-17:30	<u>Дюжева-Мальцева Елена Вадимовна</u> <sup>1</sup> , Садыков Р.А. <sup>2,3</sup> , Глазков В.П. <sup>1</sup> НЕЙТРОННЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ «СЖАТИЯ» ПРОСТОЙ МАГНИТНОЙ СПИРАЛИ В ШПИНЕЛЕ <sup>114</sup> CD <sub>0,3</sub> ZN <sub>0,7</sub> CR <sub>2</sub> SE <sub>4</sub> ПОД ДАВЛЕНИЕМ НА РЕАКТОРЕ ИР-8. (онлайн) <sup>1</sup> <i>Национальный исследовательский центр Курчатовский институт, Москва, Россия</i> <sup>2</sup> <i>Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), Троицк, Россия</i> <sup>3</sup> <i>Институт физики высоких давлений имени Л. Ф. Верещагина РАН, Троицк, Россия</i>
17:30-17:50	<u>Масликов Александр Альбертович</u> <sup>1</sup> , Алдобаев В.Н. <sup>2</sup> , Артемьева А.Д. <sup>3</sup> , Саморокова В.И. <sup>4</sup> ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КРИТЕРИЕВ МНОЖЕСТВЕННЫХ СРАВНЕНИЙ НА ВЫБОРКАХ ИЗ НЕНОРМАЛЬНЫХ И НЕГОМОГЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО. (онлайн) <sup>1</sup> <i>Филиал «Протвино» государственного университета «Дубна», г.Протвино, Россия.</i> <sup>2</sup> <i>НИЦ ТБП – филиал ФГБУ «ГНЦ Институт иммунологии», г.Большевик, ФМБА России.</i> <sup>3</sup> <i>Политехнический университет Петра Великого, институт биомедицинских систем и биотехнологий, г.Санкт-Петербург, Россия.</i> <sup>4</sup> <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> <sup>1,2</sup> , Гроздов Д.С. <sup>1</sup> ВЛИЯНИЕ РЕАКЦИИ <sup>28</sup> Si(n, p) <sup>28</sup> Al НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЛЮМИНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА. (очно) <sup>1</sup> <i>ОИЯИ, Дубна, Россия</i> <sup>2</sup> <i>НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия</i>
10:40-11:00	<u>Рунов Владимир Владимирович</u> <sup>1</sup> , Бугров А.Н. <sup>2,3</sup> , Смыслов Р.Ю. <sup>1,2</sup> , Копица Г.П. <sup>1</sup> , Иванькова Е.М. <sup>2</sup> , Павлова А.А. <sup>4</sup> , Феоктистов А. <sup>5</sup> МАГНИТНОЕ РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ В ВОССТАНОВЛЕННОМ ОКСИДЕ ГРАФЕНА. (очно) <sup>1</sup> <i>НИЦ КИ ПИЯФ, 188300 Гатчина, Россия</i> <i>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 188300 Гатчина, Россия</i> <sup>2</sup> <i>Институт высокомолекулярных соединений РАН, 199004 С.-Петербург, Россия</i>



	<sup>3</sup> ЛЭТИ, 197376 С.-Петербург, Россия <sup>4</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 С.-Петербург, Россия <sup>5</sup> Юлихский центр нейтронных исследований GmbH, 85748 Гархинг, Германия
11:00-11:20	Сархадов Иброхим <sup>1</sup> , Халиль А.С. <sup>2</sup> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ВОЗНИКАЮЩИХ В МАТЕРИАЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В РАМКАХ МОДЕЛИ ТЕРМИЧЕСКОГО ПИКА. (очно) <sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия <sup>2</sup> Государственный Университет Дубна, Инженерно-физический Институт, Дубна, Россия
11:20-11:30	КОФЕ-БРЕЙК
11:30-11:50	СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ
	Никова Екатерина Сергеевна <sup>1</sup> , Саламатов Ю.А. <sup>1</sup> , Кравцов Е.А. <sup>1,2</sup> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАНСНОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ ГАДОЛИНИЕМ В МЕТОДЕ ОПОРНОГО СЛОЯ. (онлайн) <sup>1</sup> Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия <sup>2</sup> Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, Россия
	Якунина Елена Михайловна <sup>1</sup> , Кравцов Е.А. <sup>1,2</sup> ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МАГНЕТИЗМА В МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСИСТЕМАХ FE/MGO/CR/MGO/FE МЕТОДОМ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПОЛЯРИЗОВЫХ НЕЙТРОНОВ. (онлайн) <sup>1</sup> ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия <sup>2</sup> 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 <sup>1</sup> , Коноваленко М.А. <sup>1</sup> , Куклин А.И. <sup>2</sup> , Еник Т. <sup>2</sup> , Иваньков А.И. <sup>2</sup> , Ской В.В. <sup>2</sup> ФОРМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ ЮМО, ИБР-2. (очно) <sup>1</sup> Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия <sup>2</sup> Объединенный Институт Ядерных Исследований, Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка, Дубна, Россия
	Чепурченко Олеся Евгеньевна <sup>1</sup> , Балашою М. <sup>1,2,3</sup> , Рогачев А. <sup>1,4</sup> , Кичанов С. <sup>1</sup> , Лизунов Е. <sup>1</sup> , Драголич К.А. <sup>2</sup> , Ионашку Л. <sup>2</sup> , Нику М. <sup>2</sup> ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НЕСКОЛЬКИХ ТИПОВ МАТРИЦ ОТВЕРЖДЕННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ ПАСТ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ АЛЮМИНИЕВЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ. (очно) <sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия <sup>2</sup> Национальный институт исследований и разработок в области физики и ядерной инженерии имени Хорши Хулубея, Бухарест-Магуреле <sup>3</sup> Западный университет Тимишоары, Тимишоара, Румыния <sup>4</sup> МФТИ, Долгопрудный, 141701, Россия
	Макарова Марина Викторовна <sup>1,2</sup> , Кравцов Е.А. <sup>1,2</sup> ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРИМАГНИТНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР DY/CO РЕФЛЕКТОМЕТРИЕЙ ПОЛЯРИЗОВЫХ НЕЙТРОНОВ <sup>1</sup> ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ <sup>2</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия
	ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ

11:50-12:10	<p><u>Копица Геннадий Петрович</u><sup>1,2</sup>, Котцов С.Ю.<sup>3,4</sup>, Еров Х.Е.<sup>3</sup>, Горшкова Ю.Е.<sup>5</sup>, Устинович К.Б.<sup>4</sup>, Симоненко Н.П.<sup>4</sup>, Баранчиков А.Е.<sup>4</sup>, Иванов В.К.<sup>4</sup></p> <p>МЕЗОСТРУКТУРА ВЫСОКОПОРИСТОГО КРЕМНЕЗЕМА, ПОЛУЧЕННОГО ПУТЕМ ПИРОЛИЗА СИЛИКАТНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ. (очно)</p> <p><sup>1</sup> <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ "Курчатовский институт", Гатчина, Россия</i></p> <p><sup>2</sup> <i>Институт химии силикатов им. И. В. Гребениčkова РАН Санкт-Петербург, Россия</i></p> <p><sup>3</sup> <i>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия</i></p> <p><sup>4</sup> <i>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия</i></p> <p><sup>5</sup> <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><sup>1,2</sup>, Николаев Д.И.<sup>2</sup>, Лычагина Т.А.<sup>2</sup></p> <p>ГЛОБАЛЬНАЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ ТЕКСТУРА МИНЕРАЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА СКЕЛЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИСКОПАЕМЫХ И СОВРЕМЕННЫХ ЖИВОТНЫХ И РАСТЕНИЙ, ИЗУЧЕННАЯ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ НЕЙТРОНОВ. (очно)</p> <p><sup>1</sup> <i>Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, г. Москва, Россия</i></p> <p><sup>2</sup> <i>Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия</i></p>
12:50-13:10	<p><u>Цвигун Наталья Викторовна</u><sup>1</sup>, Смыслов Р.Ю.<sup>2,3</sup>, Горшкова Ю.Е.<sup>4</sup>, Хрипунов А.К.<sup>3</sup>,</p> <p>Ткаченко А.А.<sup>5</sup>, Pirič V.<sup>6</sup>, Radulescu A.<sup>6</sup>, Копица Г.П.<sup>3,7</sup></p> <p>К ПРОБЛЕМЕ ОРГАНИЗАЦИИ НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ <i>GLUCONACETOVASTER XYLINUS</i>. (очно)</p> <p><sup>1</sup> <i>ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия</i></p> <p><sup>2</sup> <i>Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Россия</i></p> <p><sup>3</sup> <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, Россия</i></p> <p><sup>4</sup> <i>Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка, Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия</i></p> <p><sup>5</sup> <i>Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия</i></p> <p><sup>6</sup> <i>JCNS, Forschungszentrum Jülich GmbH, Outstation at MLZ, Garching, Germany</i></p> <p><sup>7</sup> <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><sup>1,3</sup>, Карпинский Д.В.<sup>1,2</sup>, Силибин М.В.<sup>1</sup>, Латушко С.И.<sup>1,2</sup>, Желудкевич Д.В.<sup>1,2</sup>, Чобот А.Н.<sup>2</sup>, Вершинина Т.Н.<sup>3</sup></p> <p>НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И ОРБИТАЛЬНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ В МУЛЬТИФЕРРОИКАХ НА ОСНОВЕ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ МАРГАНЦА. (онлайн)</p> <p><sup>1</sup> <i>Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники" МИЭТ, Зеленоград, Россия</i></p> <p><sup>2</sup> <i>Научно-практический центр по материаловедению НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i></p> <p><sup>3</sup> <i>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия</i></p>

14:30-14:50	Белозерова Надежда Махмудовна <sup>1</sup> , Кичанов С.Е. <sup>1</sup> , Козленко Д.П. <sup>1</sup> , Лукин Е.В. <sup>1</sup> , Лис О.Н. <sup>1,2</sup> , Савенко Б.Н. <sup>1</sup> ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ФЕРРИТА Zn <sub>0.34</sub> Fe <sub>2.53</sub> O <sub>4</sub> (онлайн) <sup>1</sup> Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка, ОИЯИ, Дубна, Россия <sup>2</sup> Казанский Федеральный Университет, Казань, Россия
14:50-15:10	Сканченко Дарья Олеговна <sup>1,2</sup> , Алтынбаев Е.В. <sup>1,2,3</sup> , Сидоров В.А. <sup>2</sup> , G. Chaboussant <sup>5</sup> , N. Martin <sup>5</sup> , Саламатин Д.А. <sup>3</sup> , Григорьев С.В. <sup>1,3</sup> , Щелкачев Н.М. <sup>2</sup> , Магнитская М.В. <sup>2</sup> , Цвященко А.В. <sup>2</sup> . РАСЩЕПЛЕНИЕ МАГНИТНОГО И КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЙ В Fe <sub>1-x</sub> RH <sub>x</sub> Ge. (онлайн) <sup>1</sup> Петербургский Институт Ядерной Физики НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, 188300 Санкт-Петербург, Россия <sup>2</sup> Институт Физики Высоких Давлений РАН, 142190, Троицк, Москва, Россия <sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, 198504 Санкт-Петербург, Россия <sup>4</sup> Физический институт им. Лебедева РАН, 119991, Москва, Россия <sup>5</sup> Laboratoire Leon Brillouin, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France
15:10-15:30	Гурин Валерий Степанович <sup>1</sup> , Руткаускас А.В. <sup>2</sup> , Кичанов С.Е. <sup>2</sup> , Горшкова Ю.Е. <sup>2,3</sup> ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СТЕКОЛ С ИЗЛУЧАЮЩИМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И НАНОЧАСТИЦАМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. (онлайн) <sup>1</sup> НИИ физико-химических проблем Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь <sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия <sup>3</sup> Казанский федеральный университет, Казань, Россия
15:30-15:50	КОФЕ-БРЕЙК
15:50-16:10	Mohamed A. Hafez <sup>1*</sup> , Sameh A. Akila <sup>1</sup> , Mohamed A. Khedr <sup>1</sup> , Ali S. Khalil <sup>2</sup> STUDY OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF LASER CLADDING CALCIA AND MAGNESIA-STABILIZED ZIRCONIA COATINGS. (онлайн) <sup>1</sup> Department of Laser Sciences and Interactions, National Institute of Laser Enhanced Sciences, Cairo University, Giza 12613, Egypt. <sup>2</sup> 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 <sup>1</sup> , Бабынин Э.В. <sup>2</sup> , Минзанова С.Т. <sup>3</sup> ASPERGILLUS NIGER AM1 – ПРИМЕР ЭКСТРЕМОТОЛЕРАНТНОГО ОРГАНИЗМА. (онлайн) <sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технологический университет, <sup>2</sup> Татарский НИИХП ФИЦ КазНЦ РАН <sup>3</sup> 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.