

УТВЕРЖДАЮ

№ 121111900090-5

Директор института

_____ В.Г. Трубников

« ____ » _____ 2022_ г.

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

по теме:

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ ИСТОЧНИКОВ
ИМПУЛЬСНОГО ИЛИ ПОСТОЯННОГО ТИПА

(промежуточный)

Этап 1

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

Договор на выполнение составной части исследовательской программы (проекта) от 22 января 2022 г. № 400/1979 в рамках Соглашения о предоставлении субсидии между ОИЯИ и Минобрнауки России от 13 октября 2021 г. № 075-10-2021-115

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

подпись, дата

А.В. Белушкин

Дубна 2022

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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

подпись

А.В.Белушкин

Исполнитель проекта,
старший научный
сотрудник

подпись

А.А. Богдзель

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

подпись

В.И. Боднарчук

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

подпись

И.В.Гапон

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

подпись

Е.В.Лычагин

Исполнитель проекта,
старший инженер

подпись

А.Г.Колесников

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

В.М.Милков

подпись

Исполнитель проекта,
м.н.с.

В.В.Садилов

подпись

Исполнитель проекта,
с.н.с.

А.В.Чураков

подпись

Исполнитель проекта,
инженер

В.В.Баутин

подпись

Исполнитель проекта,
Научный сотрудник

К.М.Саламатин

подпись

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

Б.Ж.Залиханов

подпись

Исполнитель проекта,
лаборант

Т.В.Милкова

подпись

Исполнитель проекта,
ст.инженер

А.В. Алтынов

подпись

Исполнитель проекта,
мнс

М.О. Петрова

подпись

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.

подпись

И.В. Ковалев

Исполнитель проекта,
инженер-электроник

подпись

М.Л. Коробченко

Исполнитель проекта,
научный сотрудник

подпись

А.К. Курилкин

Исполнитель проекта,
снс

подпись

Е.И. Литвиненко

Исполнитель проекта,
старший инженер

подпись

Г.Е. Малькова

Исполнитель проекта,
ведущий инженер

подпись

И.А. Морковников

Исполнитель проекта,
инженер-программист
1 кат.

подпись

С.М. Мурашкевич

Исполнитель проекта,
инженер-программист
1 кат.

подпись

Т.Б. Петухова

Исполнитель проекта, МНС	_____ подпись	М.М. Подлесный
Исполнитель проекта, ВНС	_____ подпись	В.И. Приходько
Исполнитель проекта, инженер	_____ подпись	А.В. Семечкин
Исполнитель проекта, лаборант	_____ подпись	А.Ч. Сопубекова
Исполнитель проекта, ведущий инженер	_____ подпись	Г.А. Сухомлинов
Исполнитель проекта, инженер-электроник	_____ подпись	М.В. Тихонов
Исполнитель проекта, старший инженер	_____ подпись	Л.А. Трунтова
Исполнитель проекта, старший лаборант	_____ подпись	Ф.А. Червяков
Исполнитель проекта, СНС	_____ подпись	А.Н. Черников
Исполнитель проекта, инженер-электроник	_____ подпись	В.В. Швецов
Исполнитель проекта, инженер	_____ подпись	Н.В. Швецов

Исполнитель проекта,
лаборант

подпись

К.Р. Широков

Исполнитель проекта,
инженер-электроник 1
кат.

подпись

В.К. Широков

Исполнитель проекта,
начальник группы

подпись

А.И. Куклин

Исполнитель проекта,
МНС

подпис

А.О. Колесников

Исполнитель проекта,
СНС

подпись

Р.В. Эрхан

СПИСОК СОИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	13
ВВЕДЕНИЕ	14
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	19
1.1.1. Исследование влияния режимов технологического процесса вакуумного магнетронного распыления на характеристики плёнки карбида бора В ₄ С, осаждаемой на металлические подложки (алюминиевые листы, пластины из нержавеющей стали, алюминиевая и медная фольга)	19
1.1.2 Разработка конструкции магнетрона, имеющего высокий коэффициент использования материала мишени – карбида бора ¹⁰ В ₄ С, с применением программного пакета Elcut и программного пакета Pretarget для моделирования магнитной системы магнетрона и прогнозирования коэффициента использования мишени	31
1.1.3 Тестовые нанесения карбида бора ¹⁰ В ₄ С на полимерные плёнки из лавсана (Mylar) и полиимида (Kapton)	48
1.1.4 Реконструкция вакуумной напылительной системы VSR300 под магнетронное нанесение ¹⁰ В ₄ С на рулонные материалы из полимерных плёнок и металлической фольги	51
1.1.5 Газовый детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора В ₄ С на алюминиевой подложке	55
1.1.6 Позиционно-чувствительный мониторинг детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора В ₄ С (1 очередь)	59
1.1.7 Газовый позиционно-чувствительный детектор с резистивной нитью для применения на высоко-поточных импульсных источниках нейтронов (1 очередь)	64
1.1.8 Теоретические и экспериментальные исследования по определению оптимальной конструкции регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером (совместно с НИЦ КИ ПИЯФ)	69
1.1.9 Создание прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов	102

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

1.3.2 Разработка программы дополнительного профессионального образования (повышения квалификации)"Проведение синхротронных и нейтронных исследований" для специалистов биомедицинского профиля (совместно с К(П)ФУ)	194
1.3.3 Создание научно-образовательной лаборатории для проведения научно-исследовательские работы студентов и аспирантов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также элементов и систем экспериментальных станций (совместно с МФТИ)	195
1.3.4 Формирование перечня научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно- образовательной лаборатории в 2022 г. (совместно с МФТИ)	198
1.3.5 Ресурсное и инфраструктурное обеспечение в 2021г. научно--образовательной лаборатории для реализации выполнения научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории (совместно с МФТИ)	207
1.3.6 Реализация образовательной программы для подготовки специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня»: Модуль 1 «Нейтронные детекторы» Модуль 2 «Прикладная нейтронная физика» Модуль 3 «Проектирование интеллектуальных систем» Модуль 4 «Электроника и автоматика физических установок» (совместно с Унив. «Дубна»)	209
1.3.7 Проведение в 2021г. конференции обучающихся и исследователей в возрасте до 39 лет по тематике исследований (совместно с Унив. «Дубна»)	224
1.3.8 Разработка программы дополнительного профессионального образования (повышения квалификации) «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов археологического профиля (совместно с К(П)ФУ)	229
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	231

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

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

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Модуль 1 «Нейтронные детекторы»

Модуль 2 «Прикладная нейтронная физика»

Модуль 3 «Проектирование интеллектуальных систем»

Модуль 4 «Электроника и автоматика физических установок»

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

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

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

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

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

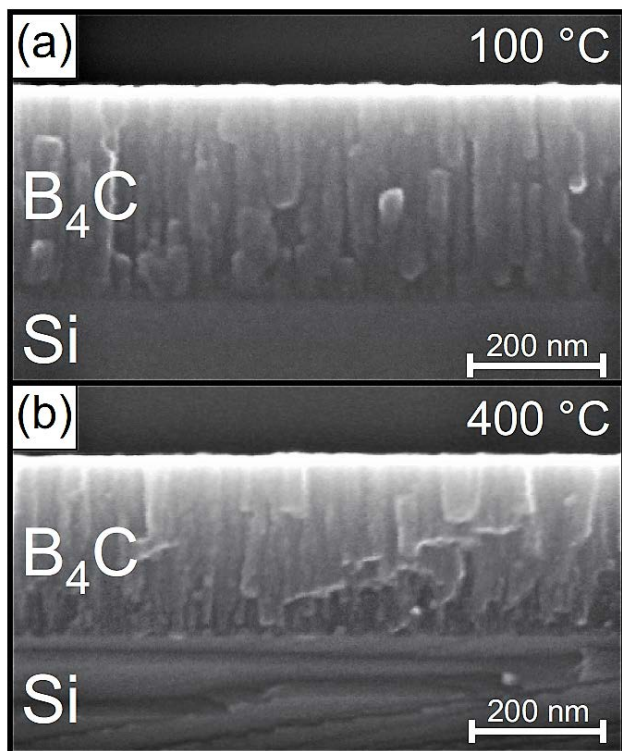


Рис. 1.1.1.1. Микрофотографии среза плёнки карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ из публикации [1.1.1.8], полученной при 100°C (a) и при 400°C (b)

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

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

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

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

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

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

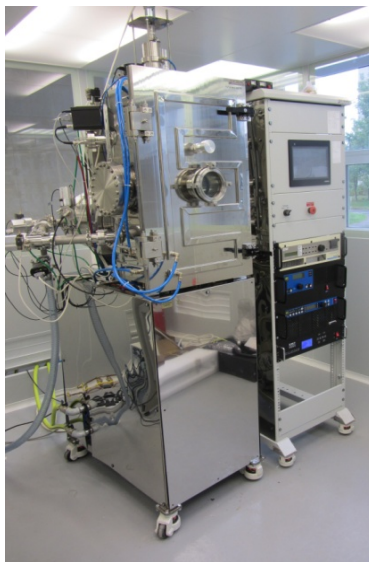


Рис. 1.1.1.2. Фото Вакуумной установки VSR-300

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

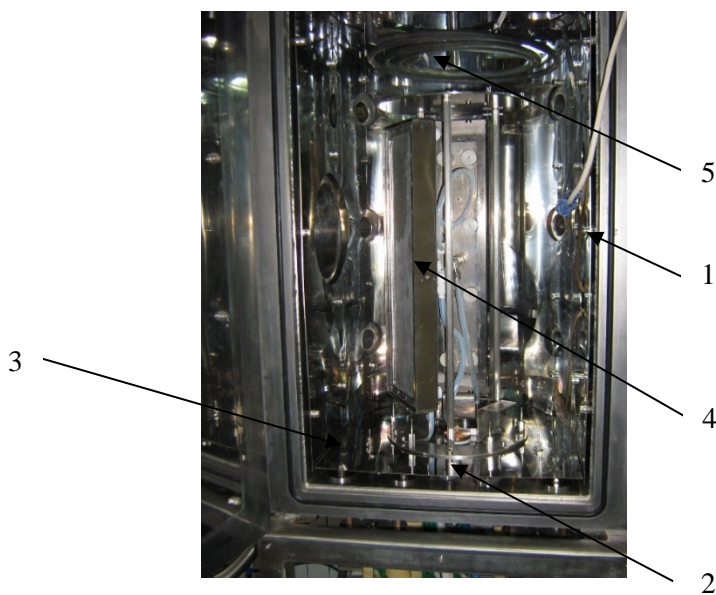


Рис. 1.1.1.3. Фотография камеры (1) VSR-300 с размещением в ней магнетрона с мишенью В₄С (на фото подставка 2 магнетрона), магнетрона с Al мишенью (3), ионного источника (4), ТЭНа (5)

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

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

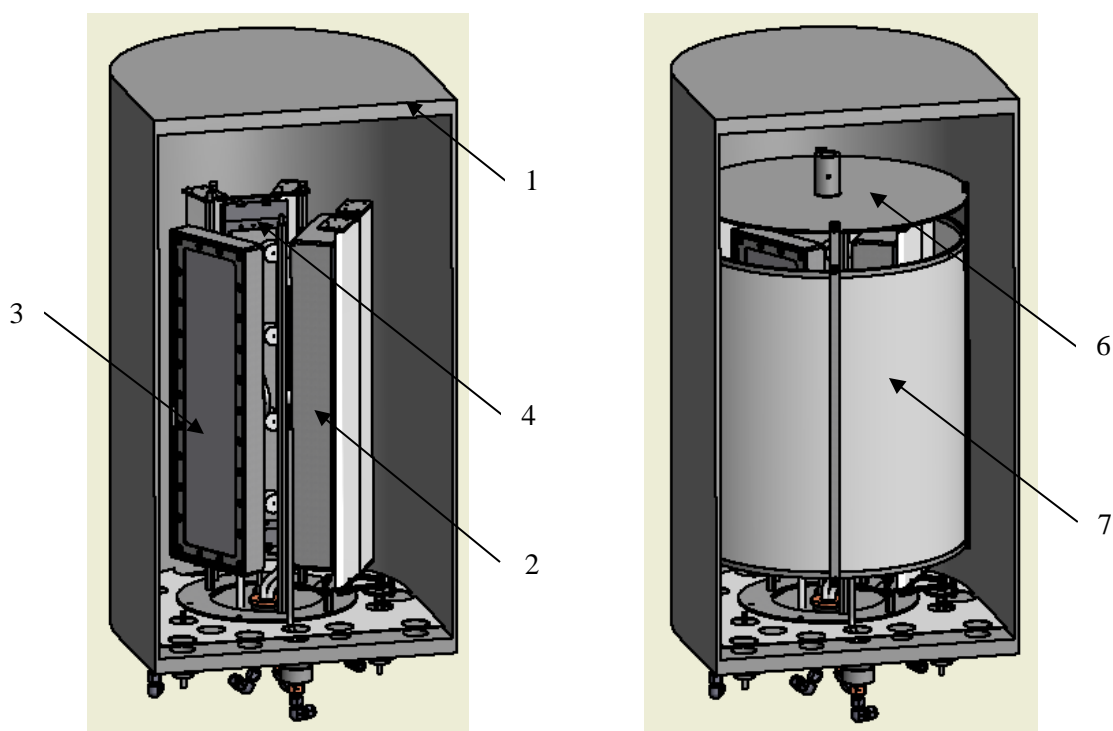


Рис. 1.1.1.4. 3D модель камеры (1) VSR-300 с размещением в ней магнетрона с мишенью В₄С (2), магнетрона с Al мишенью (3), ионного источника (4), барабана (6) с подложками (7)

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

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

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

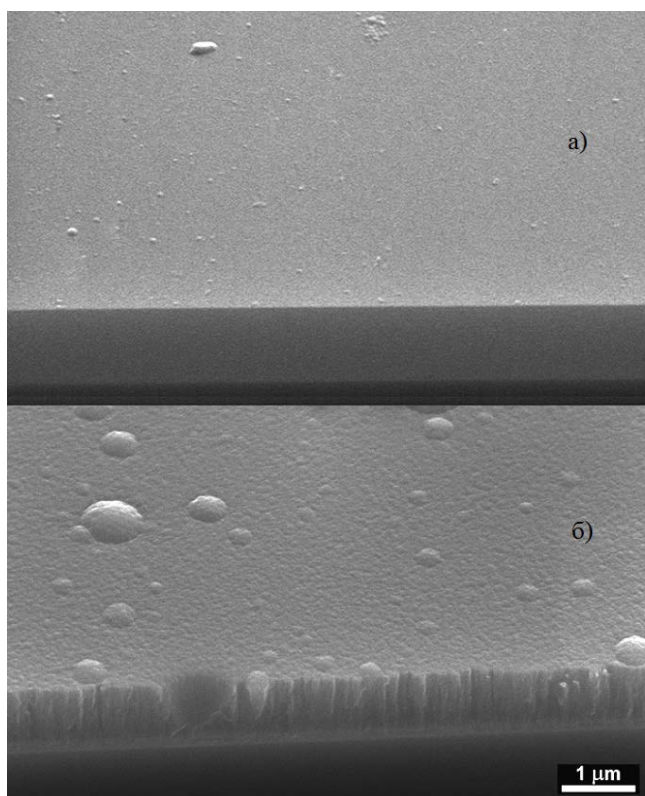


Рис. 1.1.1.5. Микрофотографии скола кремниевой подложки с плёнкой $^{nat}\text{B}_4\text{C}$ под углом 45° , полученной при 400°C и разным давлении: $0,75 \text{ мТорр}$ (а) и

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

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

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

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

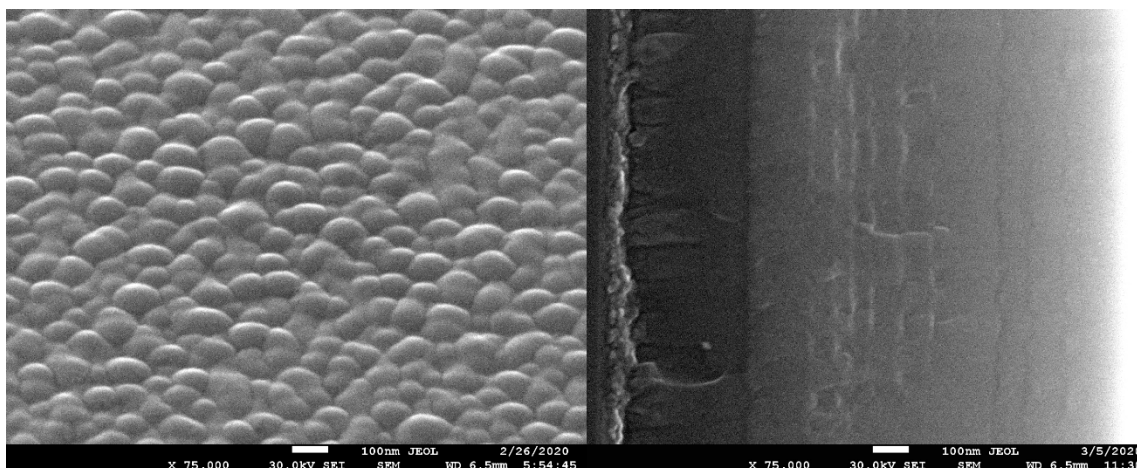


Рис. 1.1.1.6. Микрофотографии плёнки образца №1, осаждённой при 200°C, давлении Ar 1,4 мТорр.

Фото слева – поверхность под углом 45°.

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

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

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

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

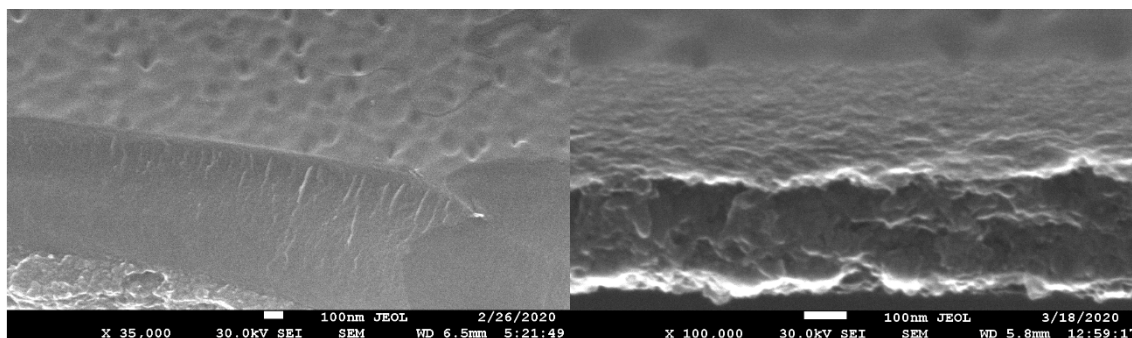


Рис. 1.1.1.7. Микрофотографии под углом 45° плёнки образца №14, осаждённой при 200°C в атмосфере Ag с ионным ассистированием, давление 1,2 мТорр. Слой Al (380 нм), слой В₄С (450 нм). Фото слева увеличение x35000. Фото справа - x100000 с другого положения, где видна структура Al-слоя.

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

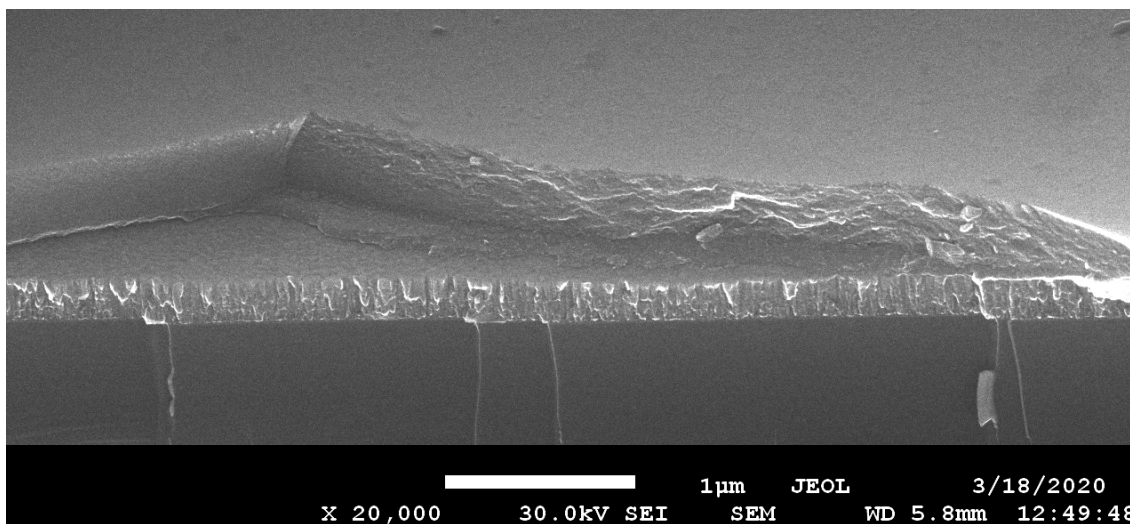


Рис. 1.1.1.8. Микрофотография под углом 45° плёнки образца №16, осаждённой в атмосфере Ag при 50°C, с применением ионного ассистирования. Давл. 1,2 мТорр.

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

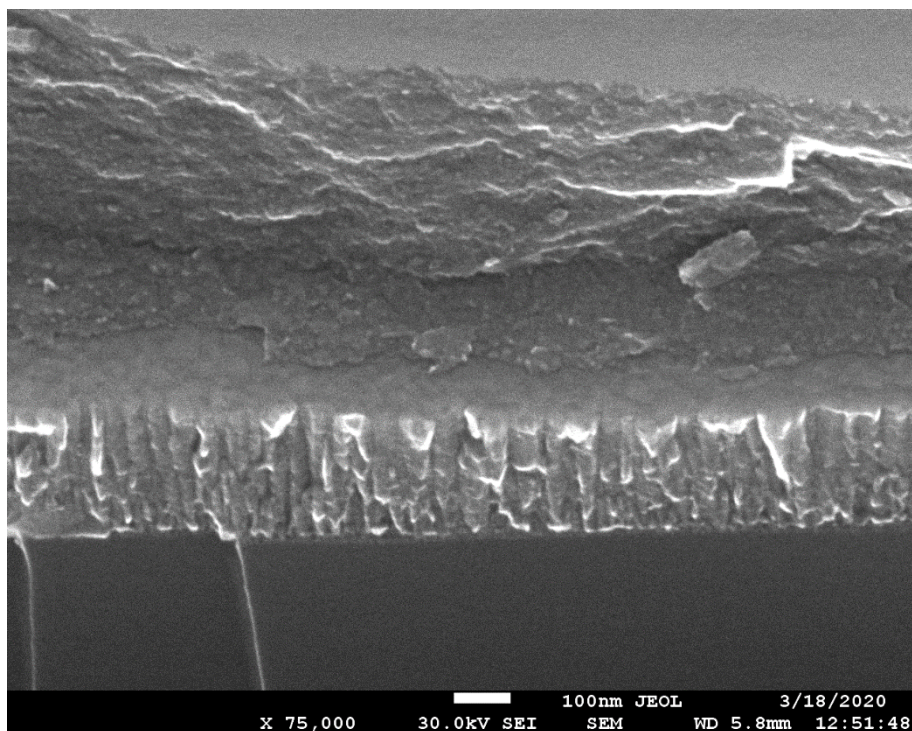


Рис. 1.1.1.9 Микрофотография под углом 45° образца №16.
Слой Al (280 нм), переходной слой ($Al + B_4C$) 70 нм, слой B_4C (500 нм).

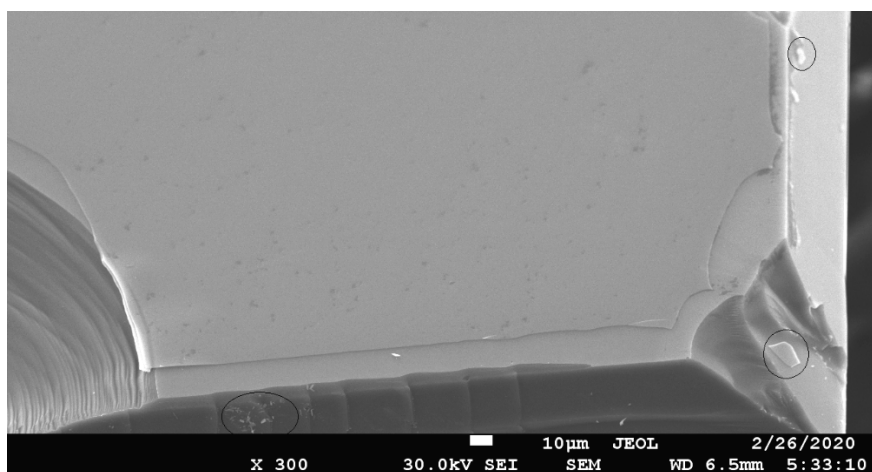


Рис. 1.1.1.10. Микрофотография образца №16. Обведены осколки слоя B_4C .

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

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

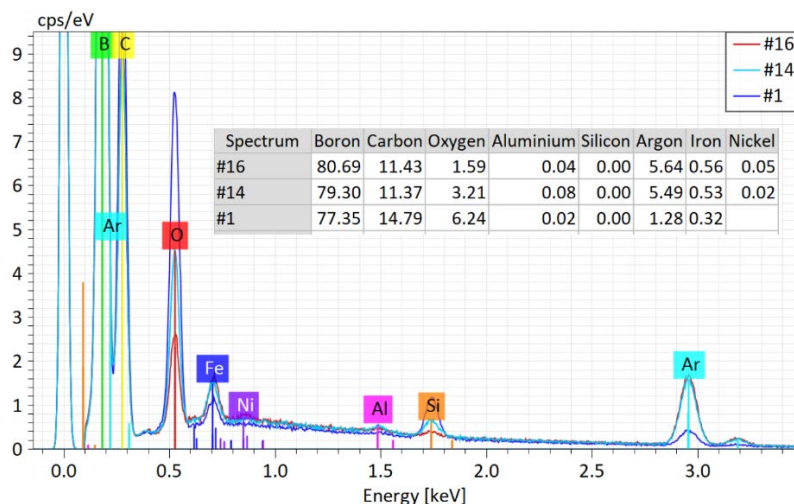


Рис. 1.1.1.11. Энергодисперсионные рентгеновские спектры плёнок W_4C , полученных без ионного ассистирования (№1) и с применением ионного ассистирования (№14, №16)

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

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

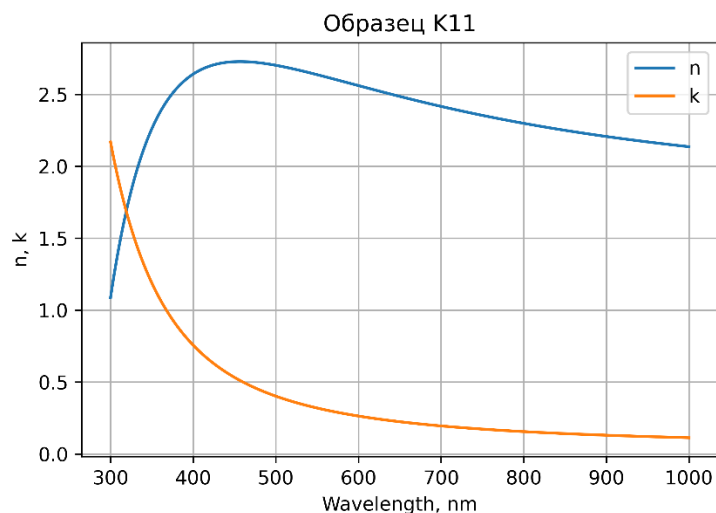


Рис. 1.1.1.11. Показатели преломления (n) и поглощения (k) плёнки В₄С, толщиной 850 нм.

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

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

Таблица 1.1.1.1. Основные особенности режимов нанесения плёнки В₄С

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

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

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

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

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

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

Получен новый тонкоплёночный функциональный материал на основе В₄С.

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

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

Приложения:

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

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

ВВЕДЕНИЕ

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

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

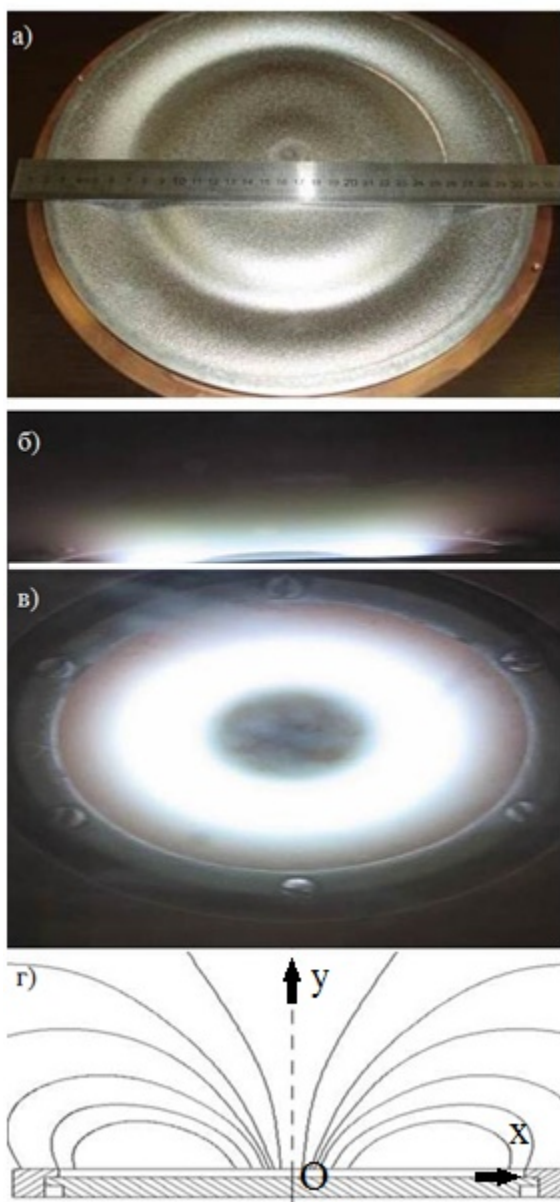


Рис. 1.1.2.1. Связь формы эрозии мишени магнетрона с свечением плазмы и конфигурацией магнитного поля

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

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

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

МОДЕЛЬ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

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

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

1) основные процессы ионизации рабочего газа, ответственные за распыление и эрозию катода-мишени происходят в приповерхностном слое;

2) максимальная яркость свечения плазмы, сосредоточена в приповерхностном слое, совпадает с наибольшей глубиной эрозии мишени;

3) границы области эрозии определяются границами свечения плазмы и границами величины V_x отличной от нуля;

4) эрозионную область можно условно разделить на область общей эрозии и эрозионную канавку;

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

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

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

Таблица 1.1.2.1

Сравнение эрозии мишени со свечением плазмы и конфигурацией магнитного поля.

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

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

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

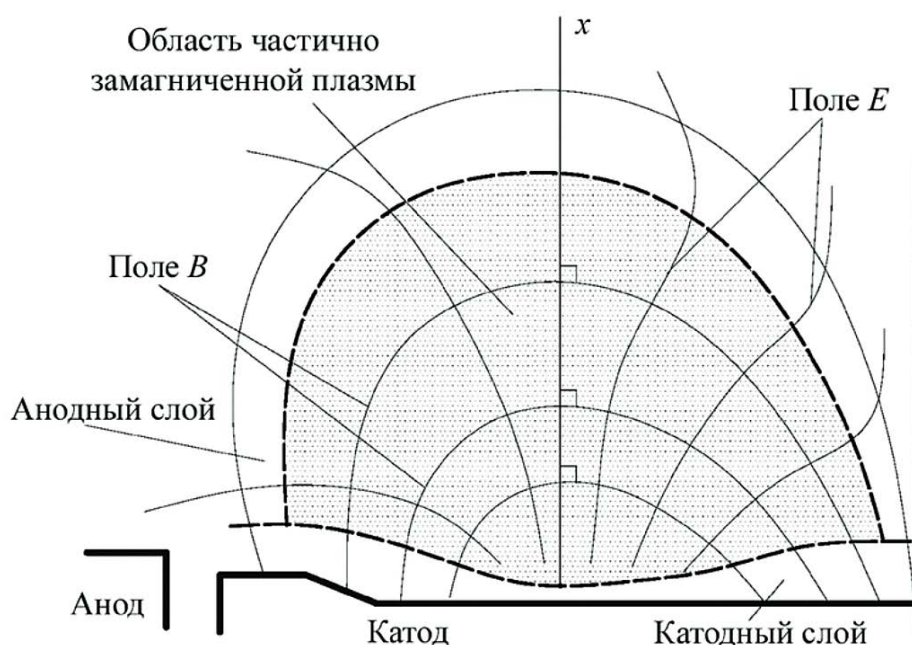


Рис. 1.1.2.2. Схема расположения характерных областей разряда в МРС.

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

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

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОФИЛЯ ВЫРАБОТКИ МИШЕНИ

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

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

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

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

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

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

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

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

ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ PRETARGER

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ МАГНЕТРОНА

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

Конструктивное решение №1

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

Магнитная система состоит (слева направо от центра):

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

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

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

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

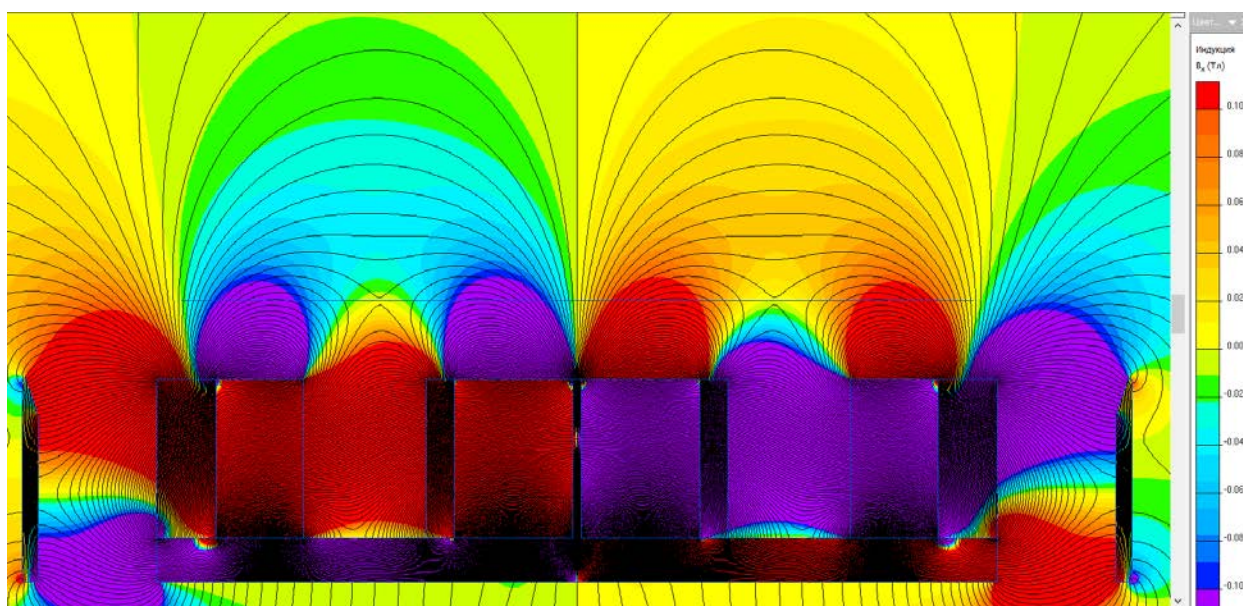


Рис. 1.1.2.3. Цветовая карта компоненты индукции магнитного поля B_x магнитной системы №1

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

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

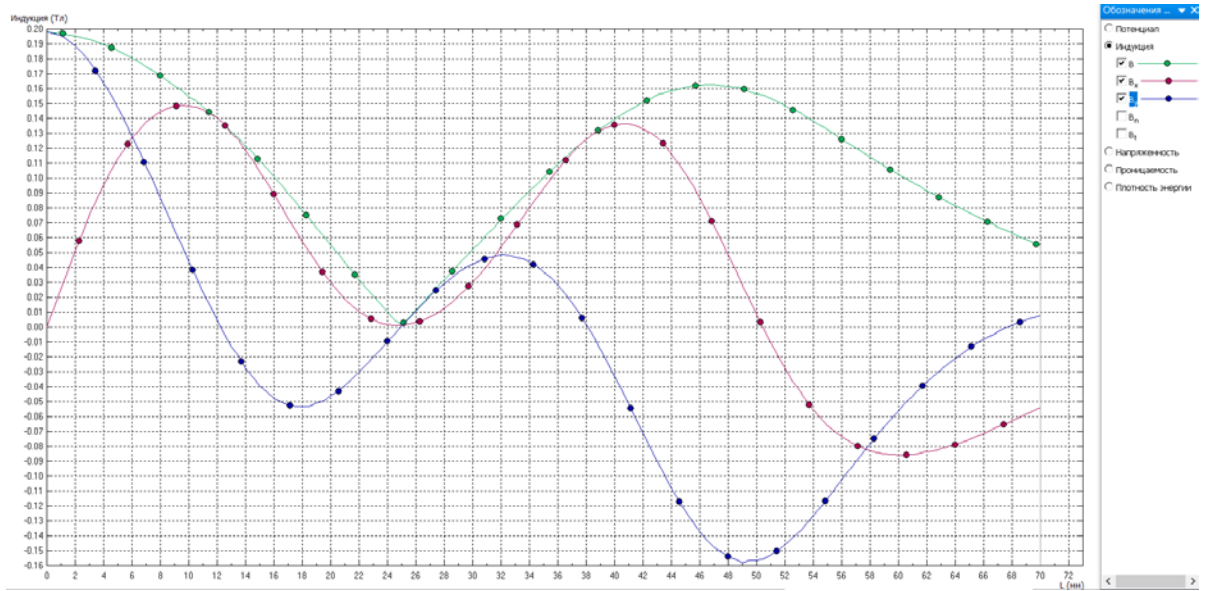


Рис. 1.1.2.4. График распределения индукции магнитного поля у поверхности мишени

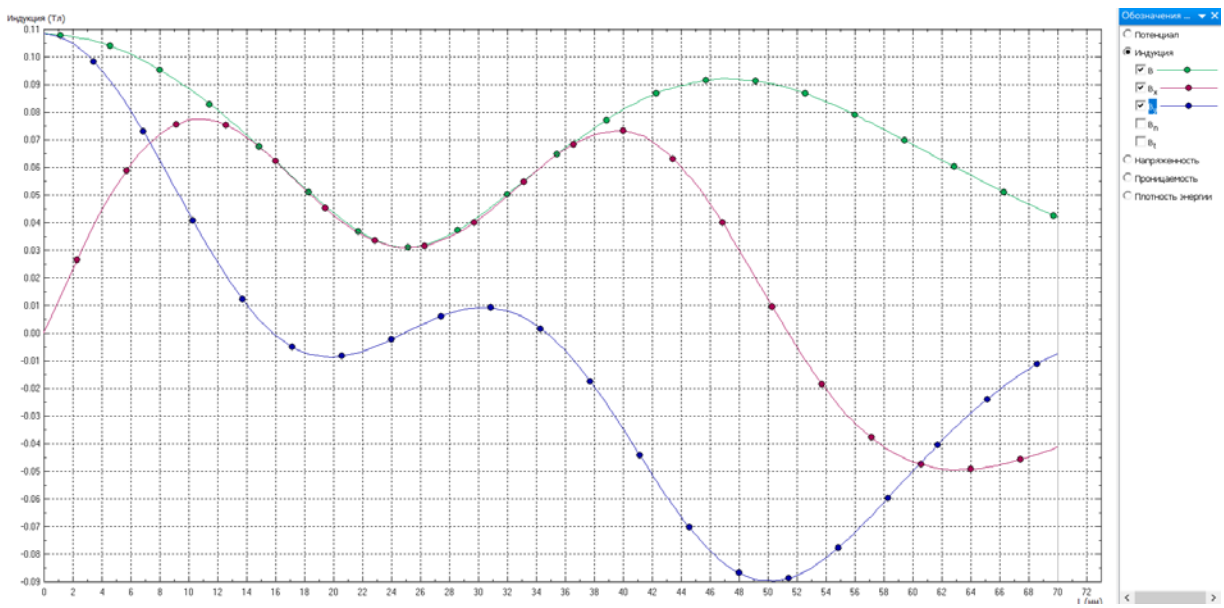


Рис. 1.1.2.5. График распределения индукции магнитного поля на расстоянии 5 мм от мишени

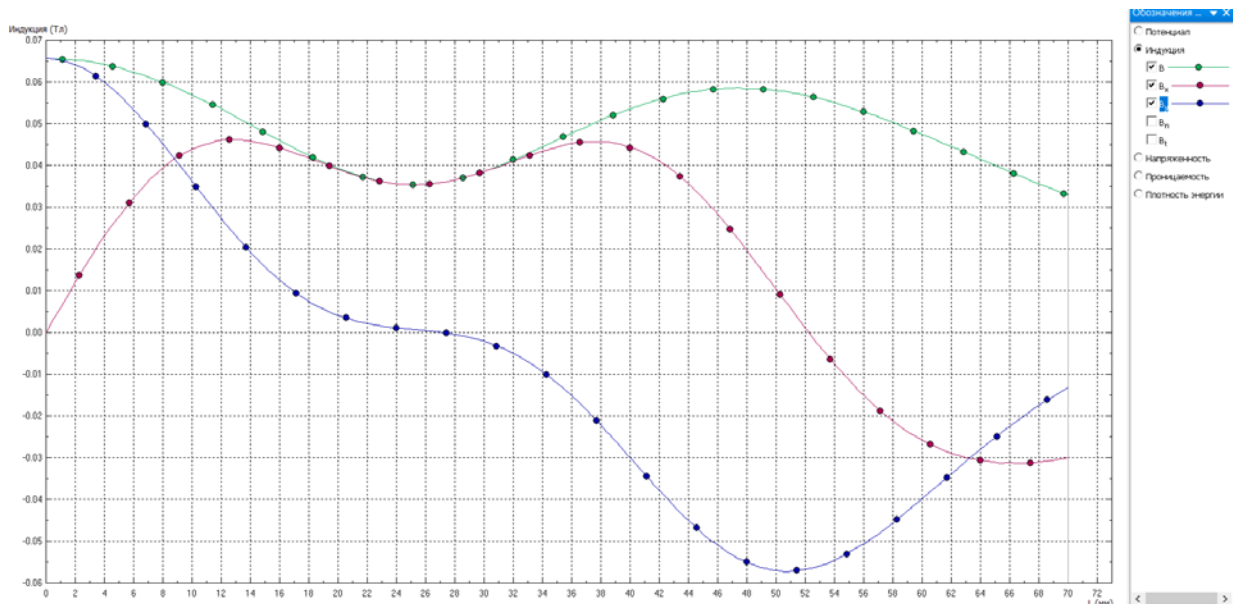


Рис. 1.1.2.6. График распределения индукции магнитного поля на расстоянии 10 мм от мишени

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

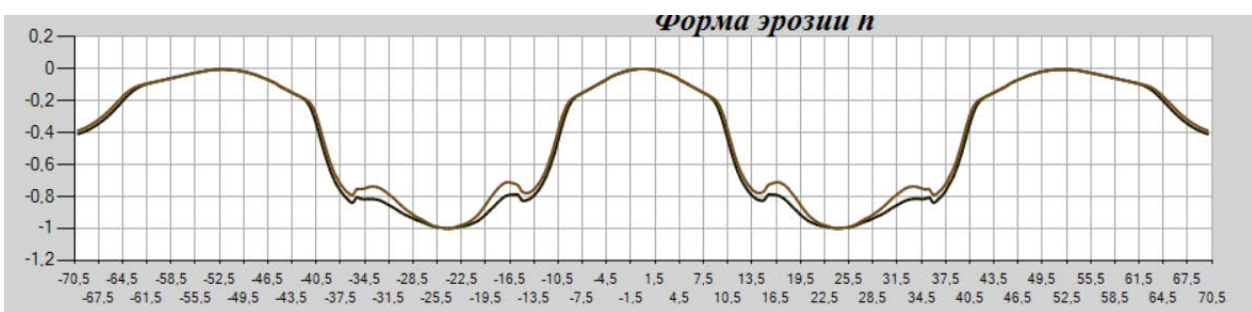


Рис. 1.1.2.7. График прогнозируемой формы эрозии при максимальном и минимальном режиме работы магнетрона

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

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

Конструктивное решение №2

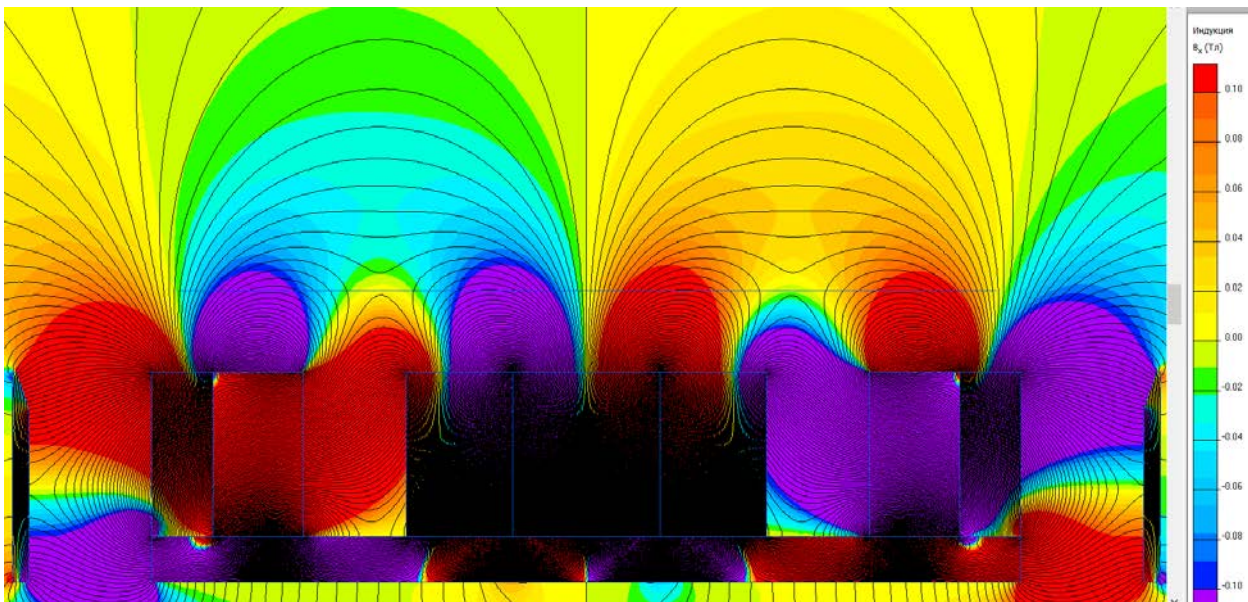


Рис. 1.1.2.8. Цветовая карта компоненты индукции магнитного поля B_x магнитной системы №2

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

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

Формула магнитной системы (правой половины):

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

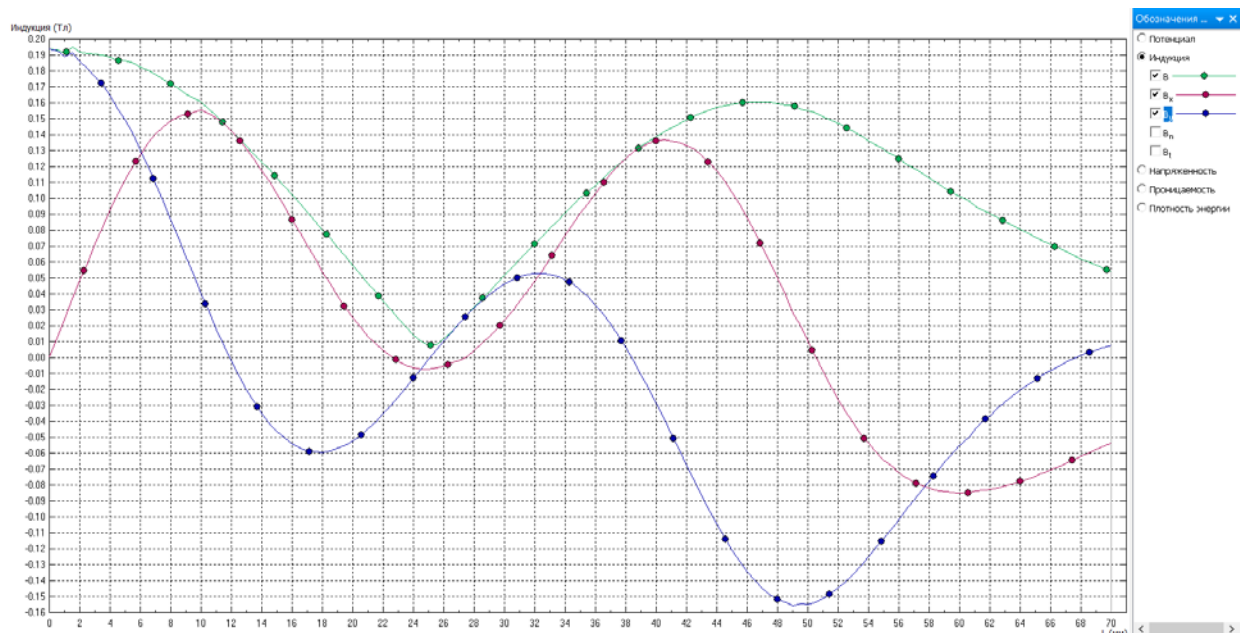


Рис. 1.1.2.9. График распределения индукции магнитного поля у поверхности мишени

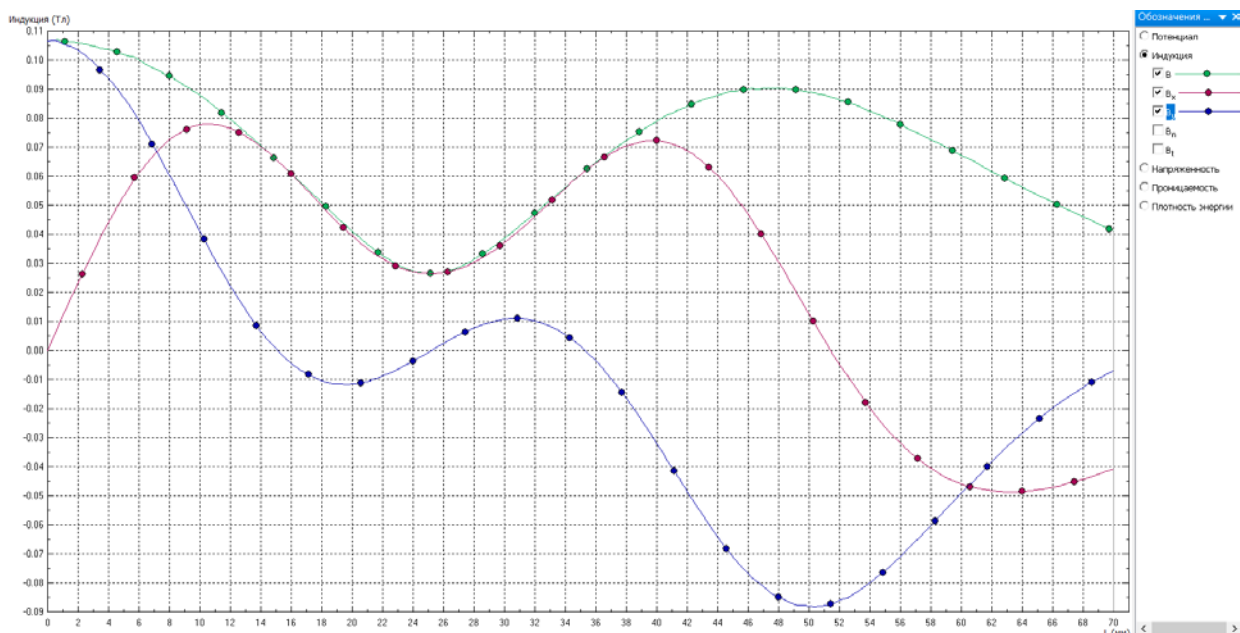


Рис. 1.1.2.10. График распределения индукции магнитного поля на расстоянии 5 мм от мишени

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

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

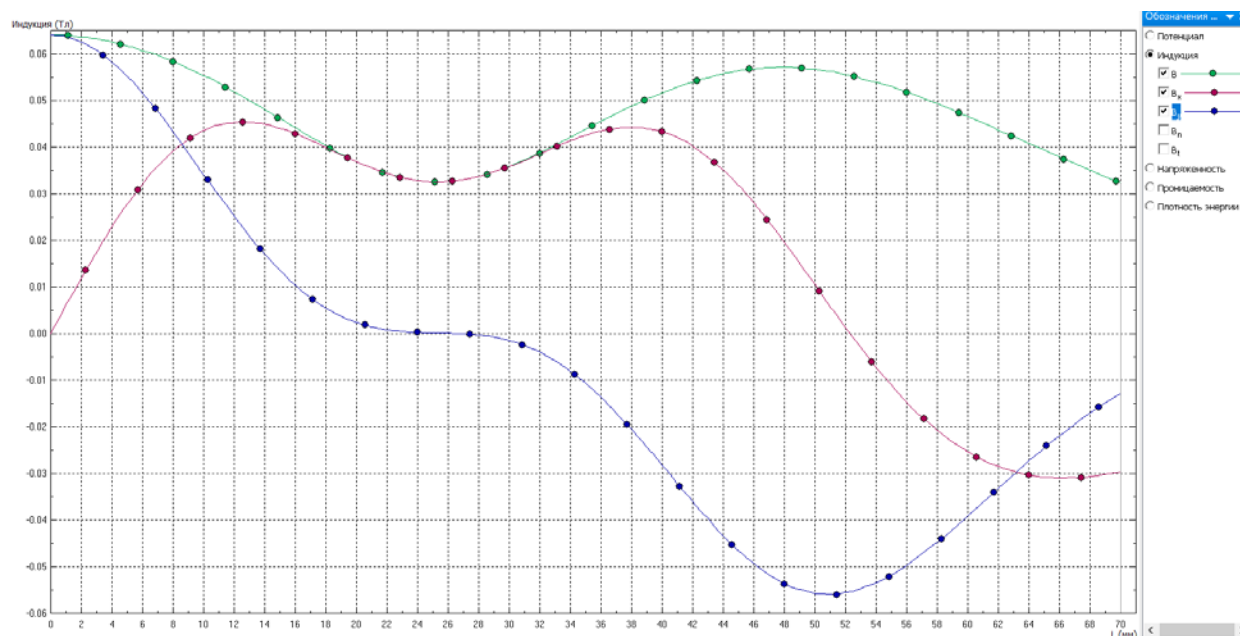


Рис. 1.1.2.11. График распределения индукции магнитного поля на расстоянии 10 мм от мишени

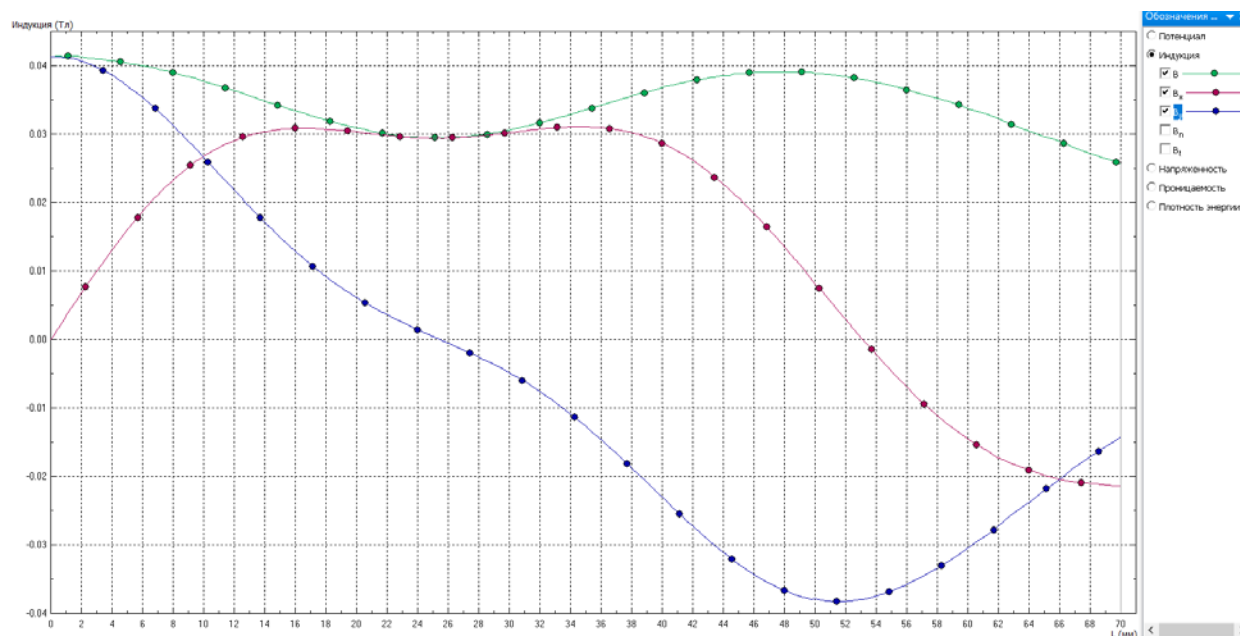


Рис. 1.1.2.12. График распределения индукции магнитного поля на расстоянии 15 мм от мишени

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

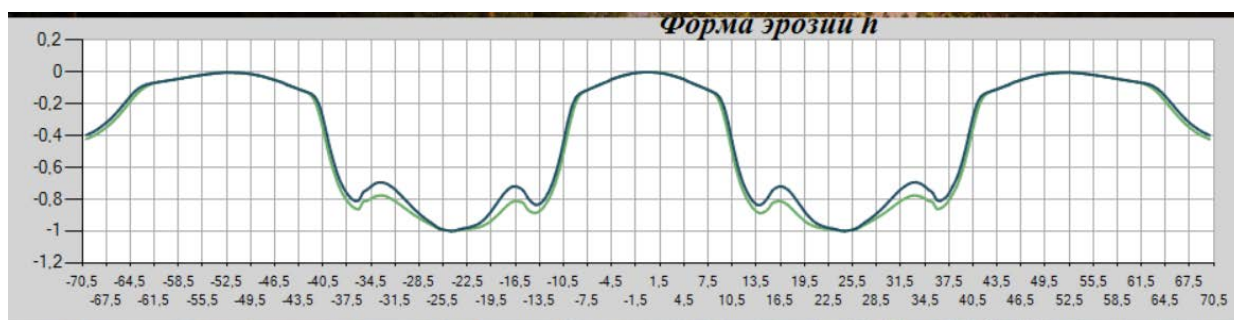


Рис. 1.1.2.13. График прогнозируемой формы эрозии при макс. и мин. работы магнетрона

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

Приложения.

1. Конструкторская документация. Прилож.1.1.2_2.pdf

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

Введение

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

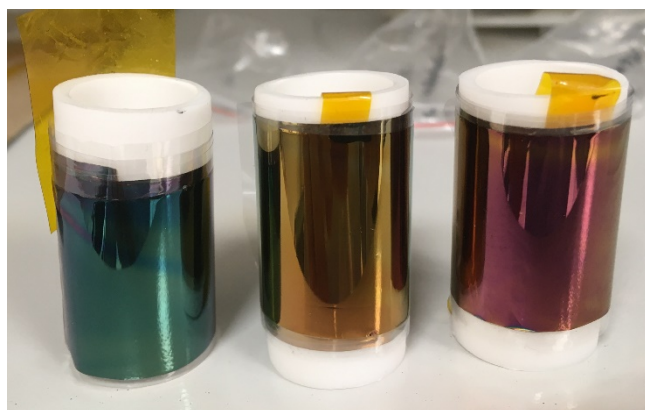


Рис. 1.1.3.1. Лавсановая плёнка с тонкоплёночным $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

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

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

РЕЗУЛЬТАТЫ

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



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

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

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

В таблицу 1.1.3.1 сведены характеристики полученных образцов.

Таблица 1.1.3.1.

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

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

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

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

ВЫВОДЫ

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

Приложения.

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

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

(1 очередь)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Конструктивные требования к модернизации вакуумной установки VSR300:

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

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

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

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

Разработан эскизный проект модернизации установки VSR300 в составе:

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

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

Приложения.

1. Конструкторская документация. Файл Прилож.1.1.4.pdf

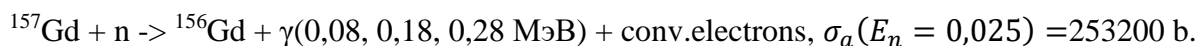
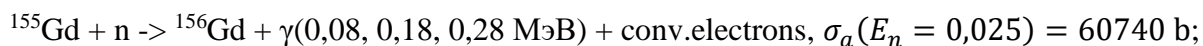
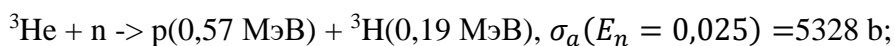
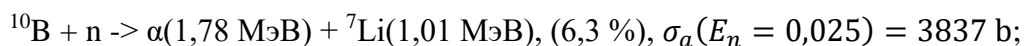
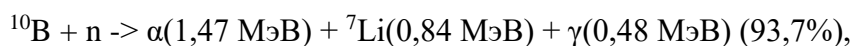
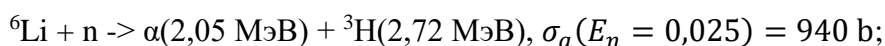
1.1.5. Газовый детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на алюминиевой подложке. (1 очередь)

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

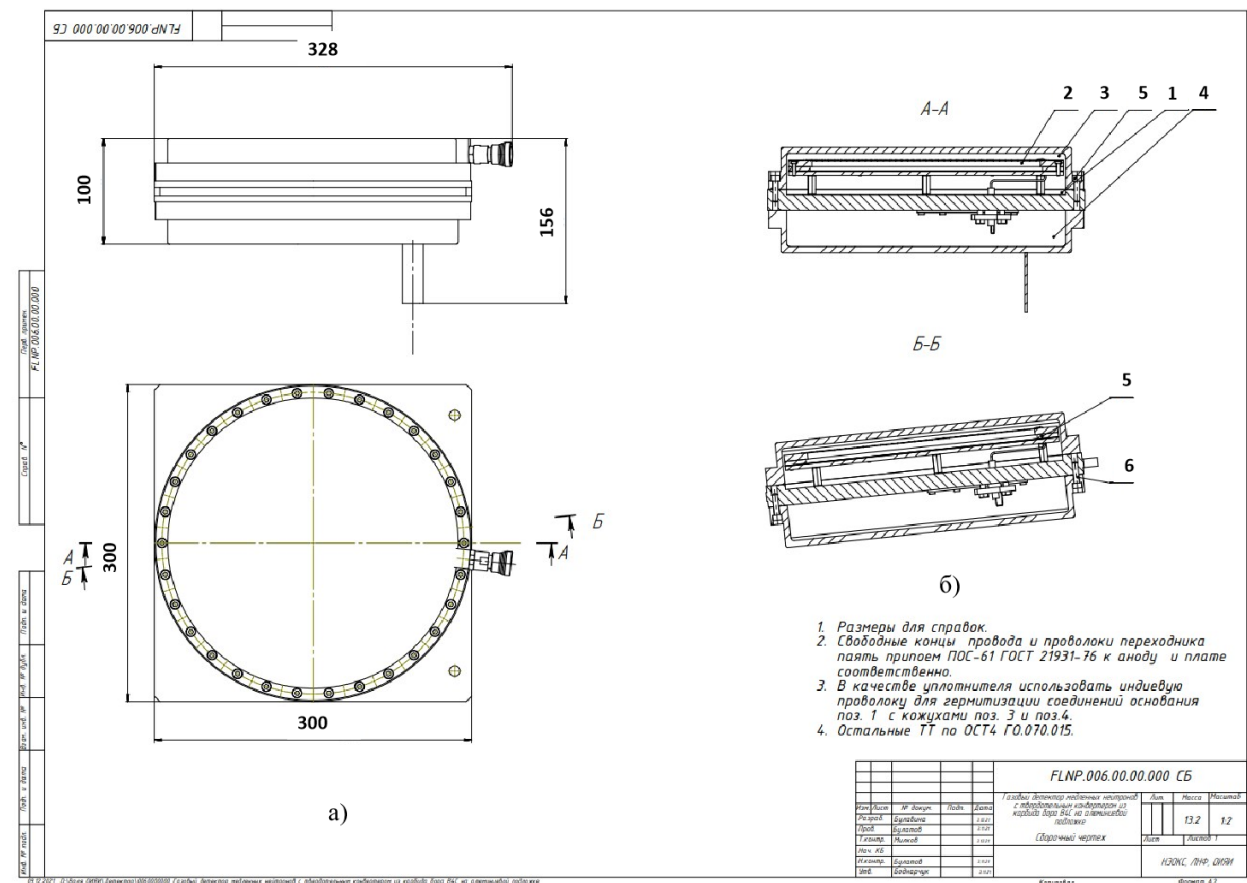


Рисунок 1.1.15.1. Газовый детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером В₄С на алюминиевой подложке: а) Внешний вид детектора - корпус (кожух) - материал АМг6; б) Разрез детектора: 1. Платформа; 2. Детектор с твердотельным конвертером из В₄С на алюминиевой подложке и анодная плоскость; 3, 4. Корпус (кожух).

Детектор представляет собой цилиндрическую пропорциональную многопроволочную камеру низкого давления. Корпус (кожух) изготовлен из алюминиевого сплава АМг6, его внешний диаметр составляет 300 мм (вместе с газовым разъемом 338 мм), внутренний 264 мм, высота 100 мм (вместе с трубкой подвода атмосферного давления 156 мм), толщина входного окна 6 мм, максимальная площадь детектирующей области составляет 366 см². Габариты детектора обусловлены профилем пучка нейтронов и требуемой эффективностью регистрации. Толщина входного окна не приводит к значительному ослаблению проходящего потока нейтронов и в то же время обеспечивает механическую надёжность конструкции детектора.

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

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

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

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

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

Приложения.

1. Конструкторская документация. Файл Прилож.1.1.5.pdf

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

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

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

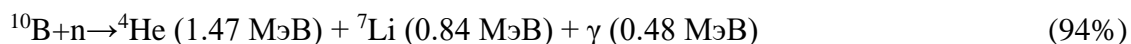
Гелиевые MWPC – детекторы, построенные по технологии применения в качестве конвертера и одновременно рабочего газ, состоящий из изотопа гелия ^3He , ограничены скоростью счёта, которая у них может достигать 10 кГц/мм^2 [1.1.6.1]. Пространственное разрешение, которое может быть достигнуто с применением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

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

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

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

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



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

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

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

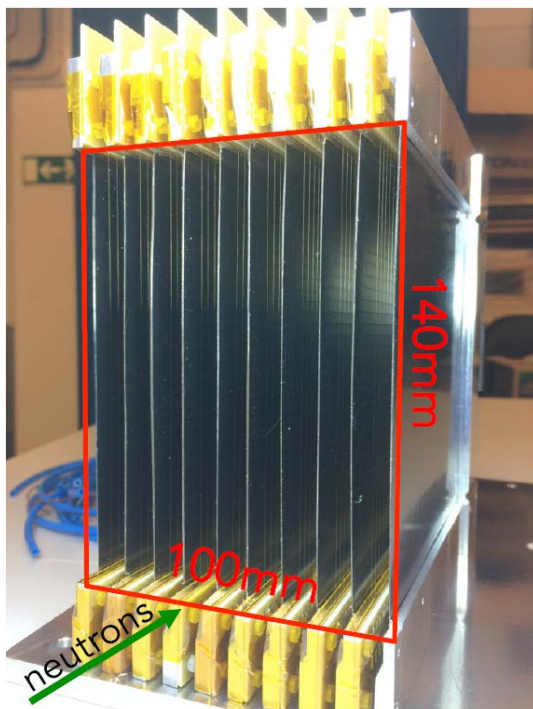


Рис. 1.1.6.1. Фотография детектора Multi-Blade.

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

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

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

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

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

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

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

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

В рамках гранта разработана конструкция нового позиционно-чувствительного детектора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

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

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

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

1. Приложения.

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

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

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

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

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

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

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

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

Модульная конструкция должна обеспечивать:

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

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

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

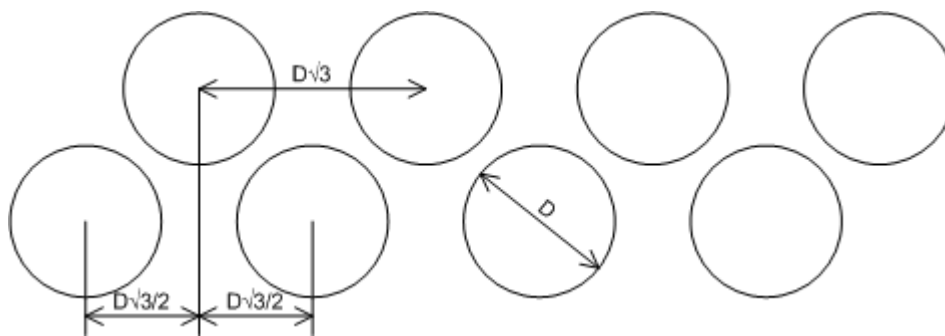


Рис. 1.1.7.1 Схема расположения счетчиков.

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

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

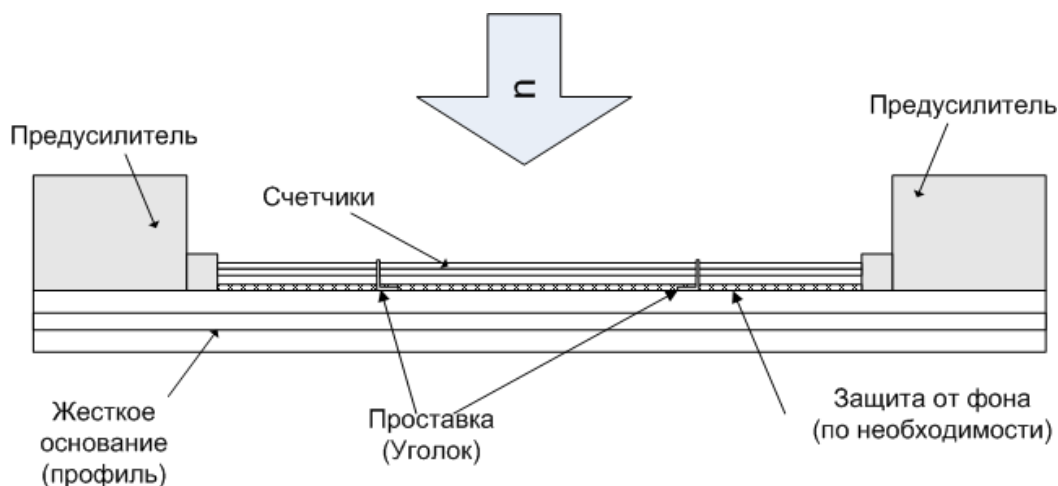


Рис. 1.1.7.2 Схема расположения элементов модуля.

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

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

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

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

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

Приложения:

1. Конструкторская документация. Прилож.1.1.7.pdf

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

1. Общие положения

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

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

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

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

Таблица 1.1.8.1. Общепринятая классификация нейтронов по энергиям.

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

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

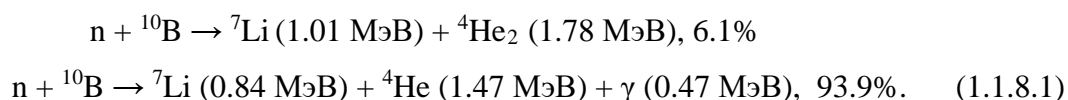
Природный бор, содержащий изотоп ^{11}B , широко распространен и существует высокопроизводительная технология обогащения его изотопом ^{10}B до концентраций 90-99%.

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

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

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

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



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

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

² Лутвин В. и др.

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

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

⁴ Croci G.

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

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

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

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

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

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

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

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

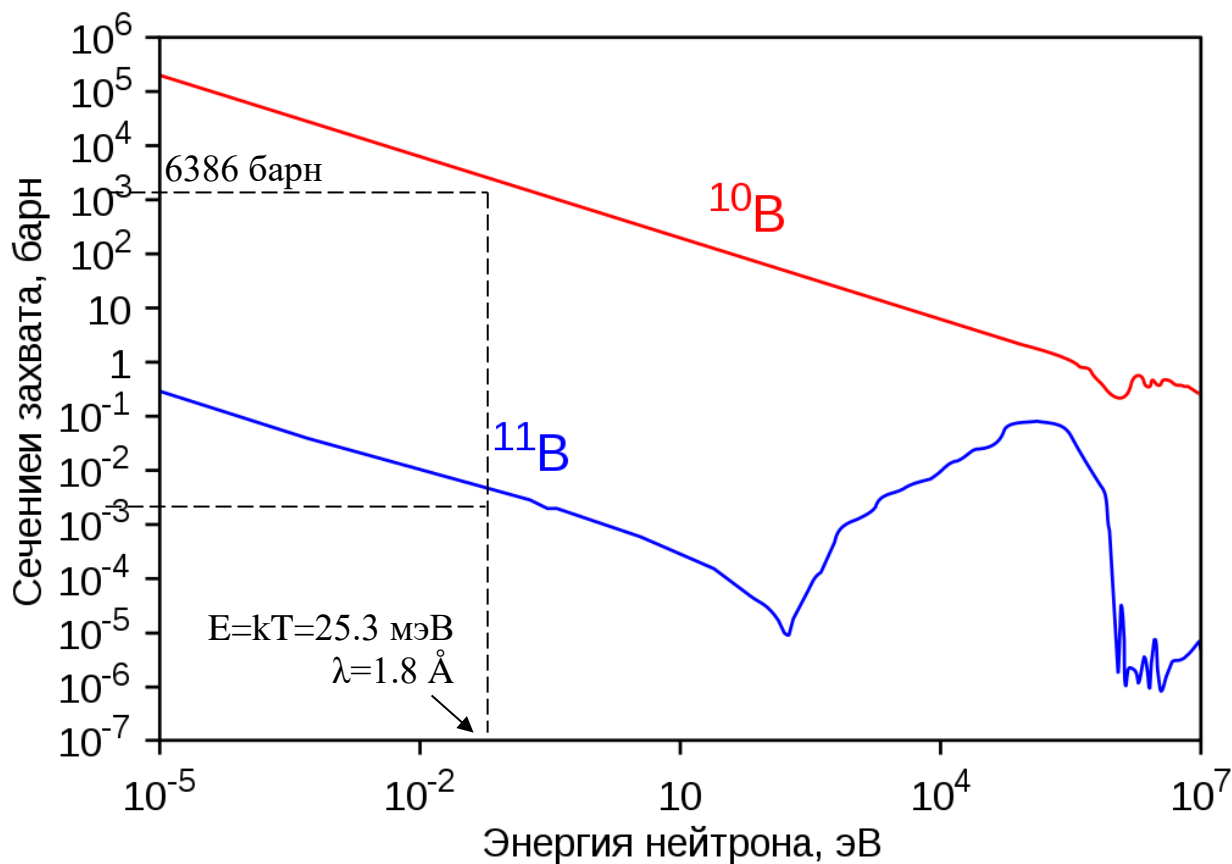


Рис. 1.1.8.1. Сечения реакции захвата нейтрона ядрами изотопов бора ^{10}B и природного ^{11}B отличаются на 6 порядков.

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

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

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

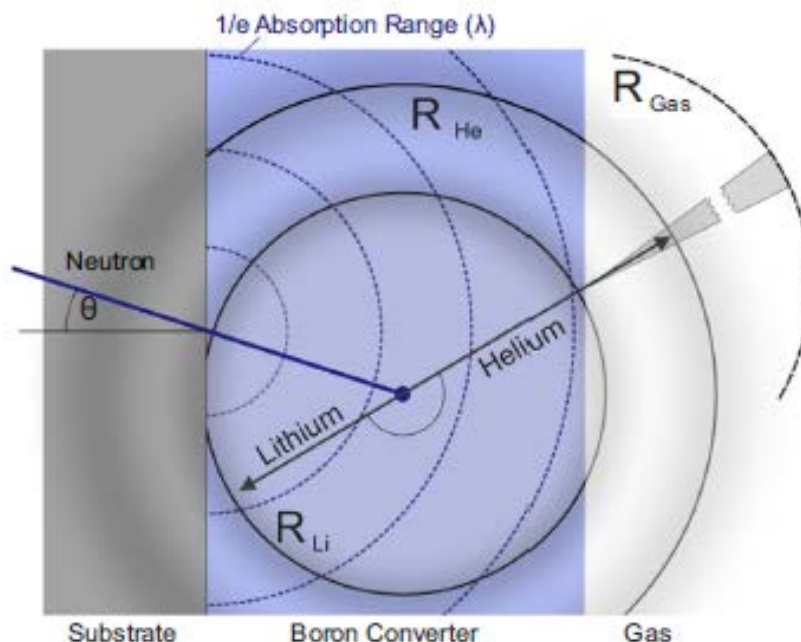


Рис. 1.1.8.2. Продукты реакции захвата нейтрона ядром ^{10}B внутри пленки вылетают в противоположные стороны изотропно так, что либо ядро лития, либо альфа-частица попадает в газ рабочего зазора детектора, где регистрируется, как заряженная частица.

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

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

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

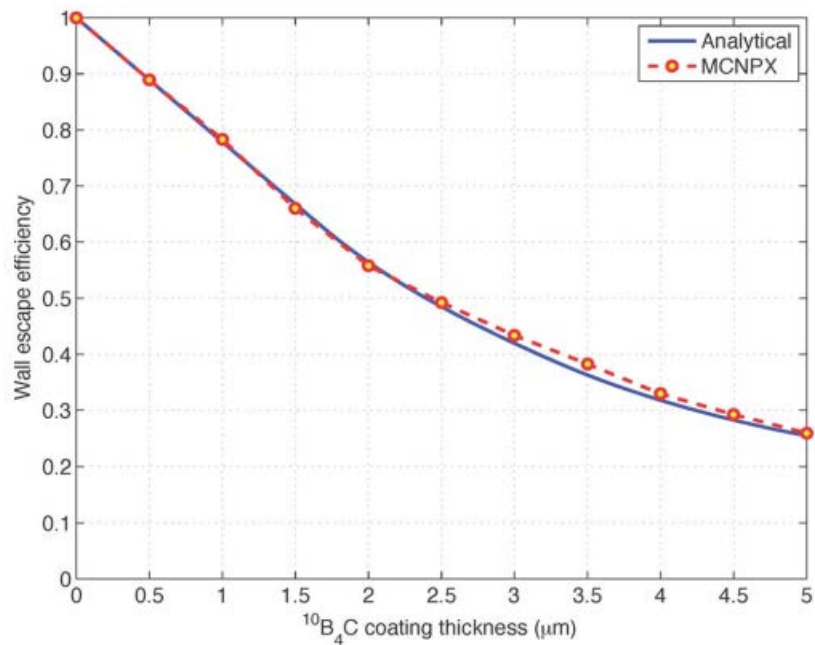


Рис. 1.1.8.3. Вероятность ϵ_{esc} выхода фрагментов реакции (1.1.8.1) из пленки $^{10}\text{B}_4\text{C}$ как функция толщины пленки.

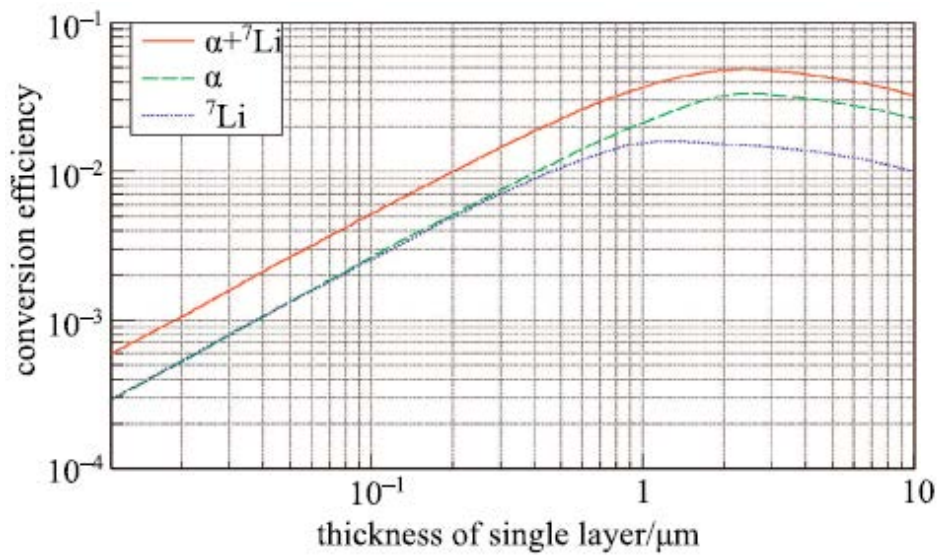
Вероятность выхода фрагментов реакции (1.1.8.1) из пленки заданной толщины дает программа SRIM. Она специально разработана для решения этой задачи.

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

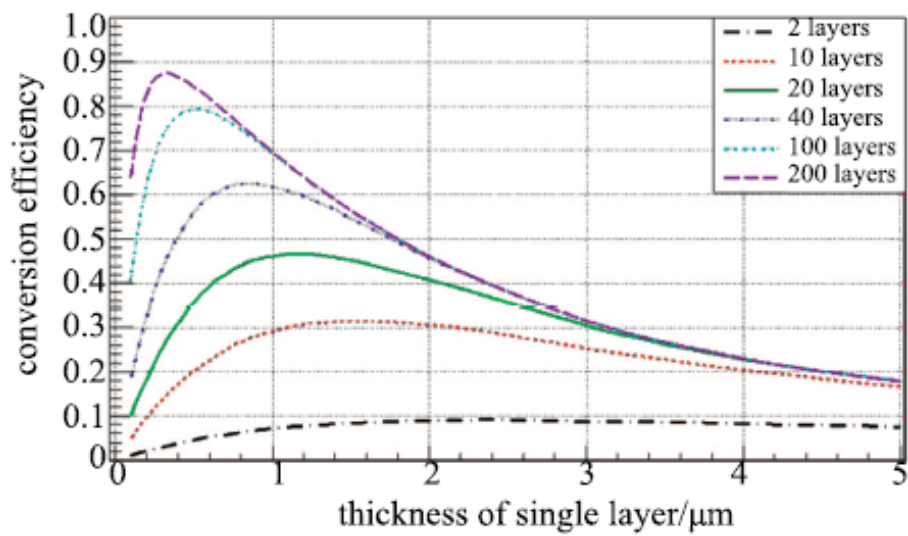
Из практики работы с газовым конвертором ^3He порог дискриминации гамма-фона принято устанавливать на уровне 100 keV. Как будет показано ниже (рис. 1.1.8.6), при таком пороге чувствительность к гамма-фону с конвертором ^{10}B не хуже 10^{-7} , а эффективность регистрации нейтрона может быть получена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

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

a



b



c

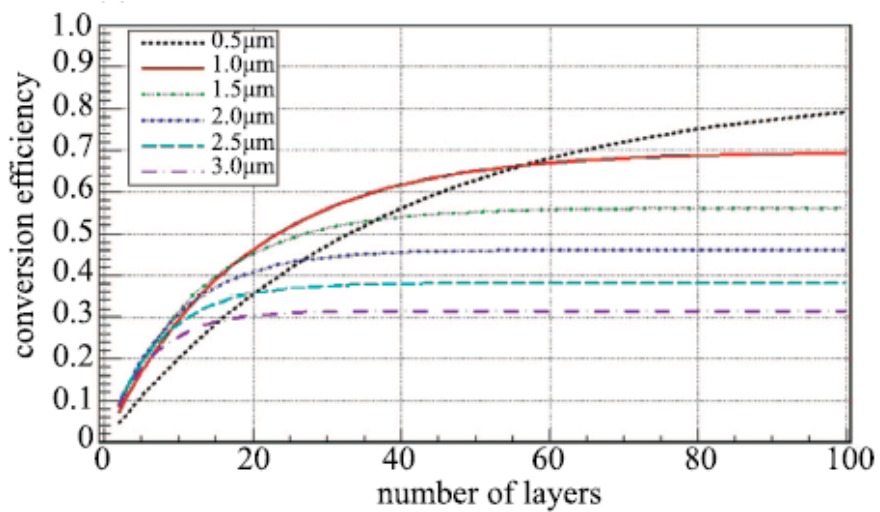


Рис. 1.1.8.4. Зависимости конверсионной эффективности от толщины слоя ${}^{10}\text{B}$ (a); зависимости эффективности регистрации нейтрона от толщины конвертора для тепловых нейтронов $\lambda=1.8 \text{ \AA}$

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

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

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

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

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

Однокоординатные детекторы на газоразрядных пропорциональных счетчиках – строу-трубках

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

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

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

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

31× boron-coated straws,
4.43 mm diameter each

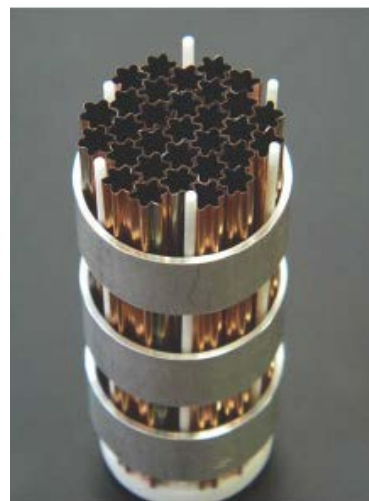
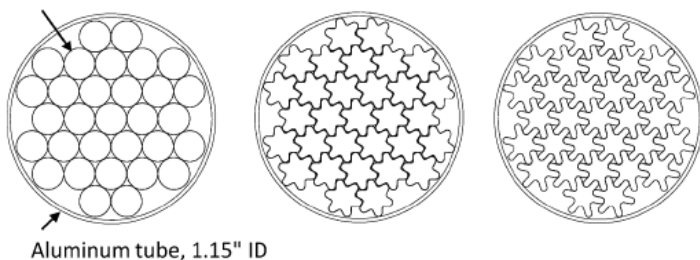


Рис. 1.1.8.5. Блоки из строу-трубок различных профилей (а), в том числе в форме “звездочек”, что исключает мертвые зоны между трубками, присущие круглым трубкам.

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

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

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

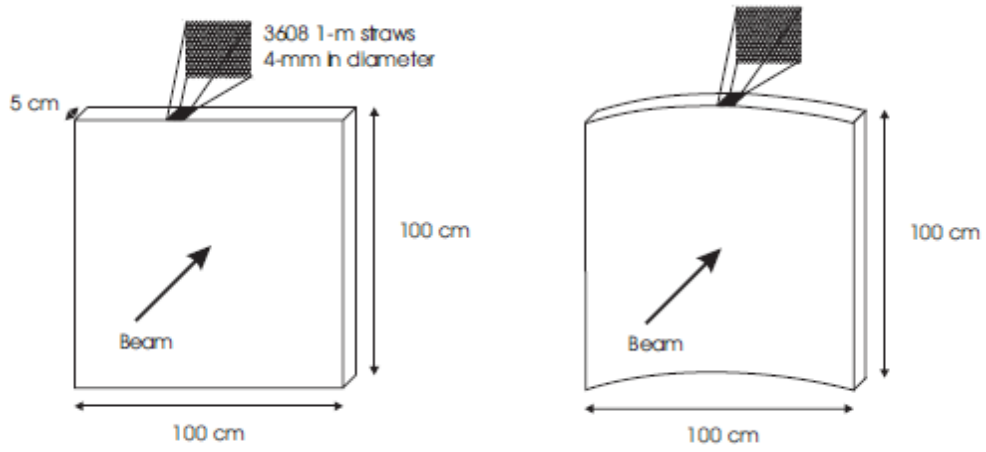
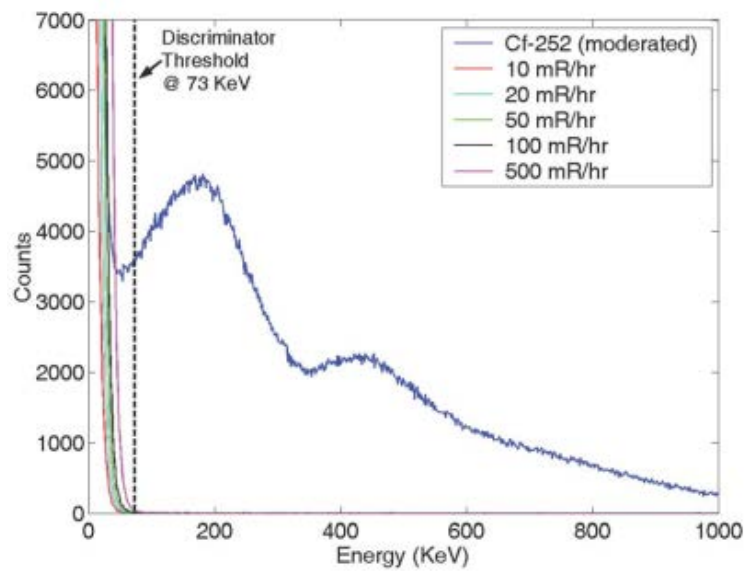


Рис. 1.1.8.6. Детекторы т.х.н. (b) с рабочей областью $100 \times 100 \text{ cm}^2$, собранные из блоков, с нанесенным на внутренние поверхности каждой трубки тонкопленочным конвертором $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

a



b

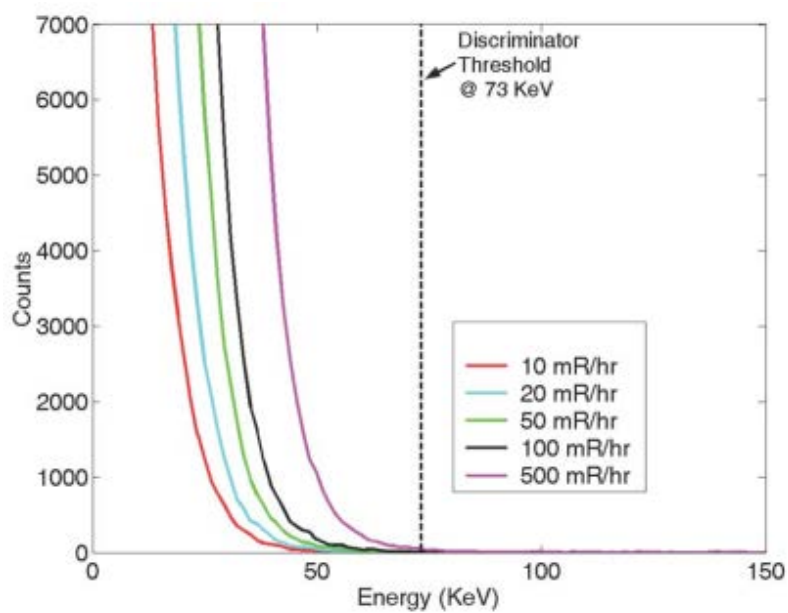


Рис. 1.1.8.7. Амплитудные спектры для т.х.н. (а) и гамма-фона (b), откуда получена чувствительность к гамма-фону для одной трубки при пороге 73 keV, составляющая 10^{-8} .

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

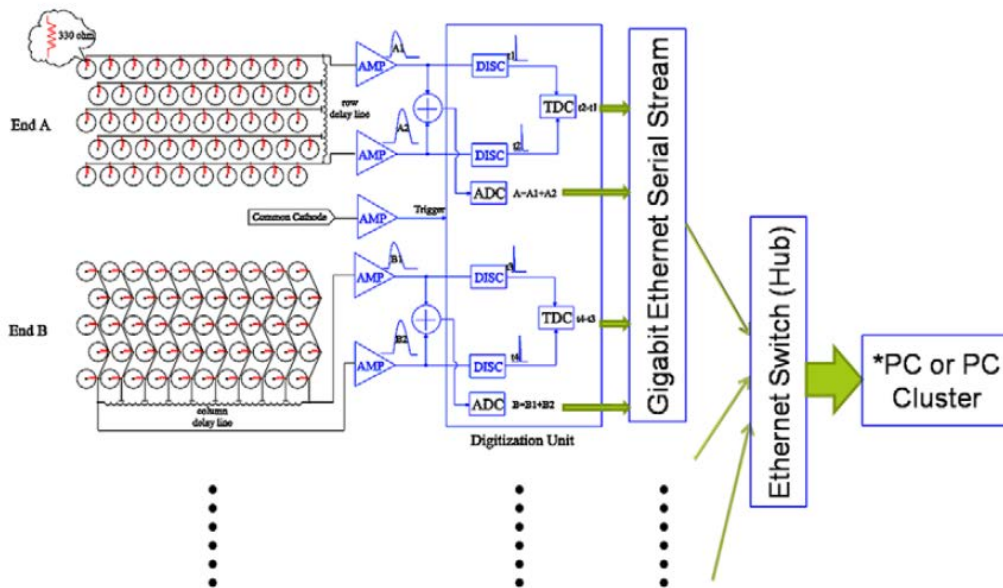


Рис. 1.1.8.8. Схема подключения блоков нейтронных строу-трубок к электронике [1.1.8.7].

Детектор Multi-Grid

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

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

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

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

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

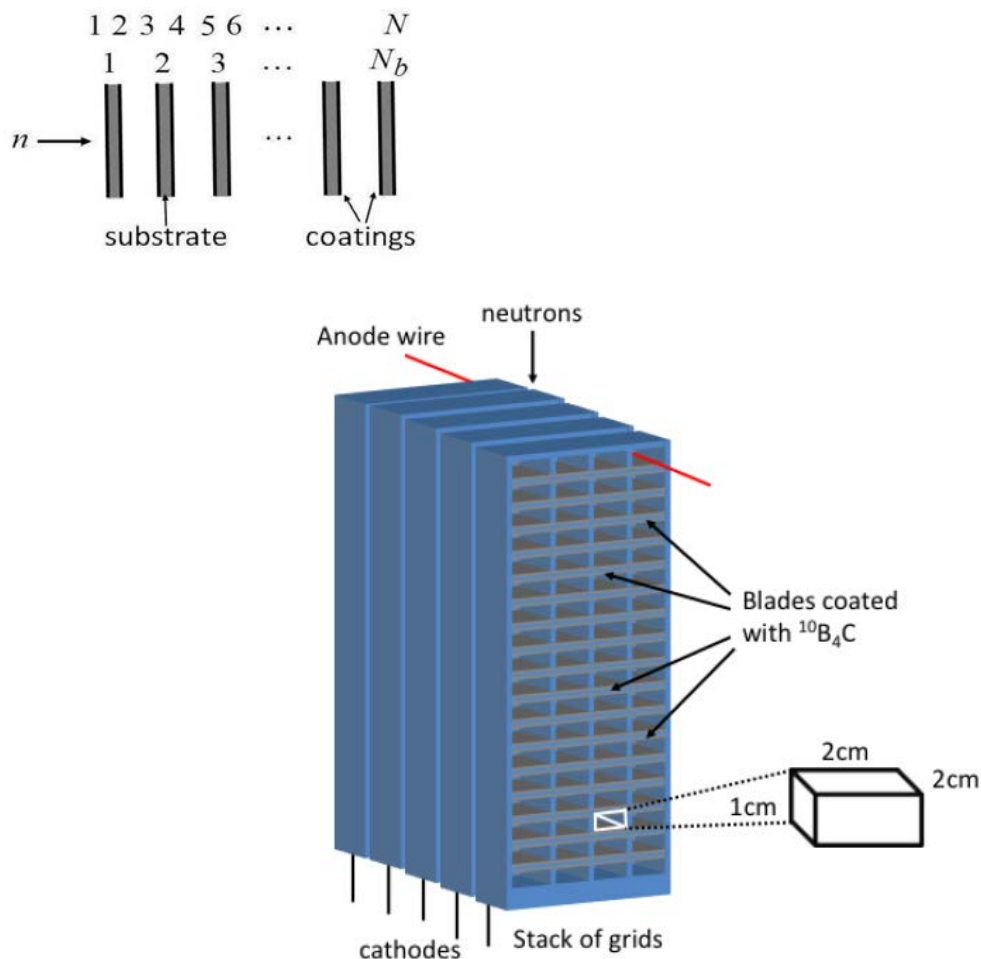


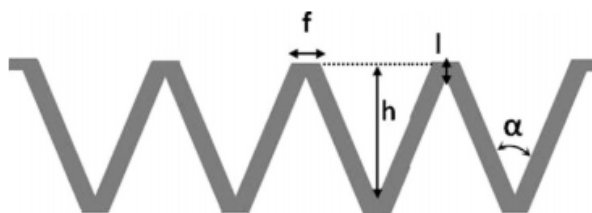
Рис. 1.1.8.9. Модуль Multi-Grid из многих элементарных ячеек.

Двухкоординатные детекторы на проволочных пропорциональных камерах MWPC

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

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

a



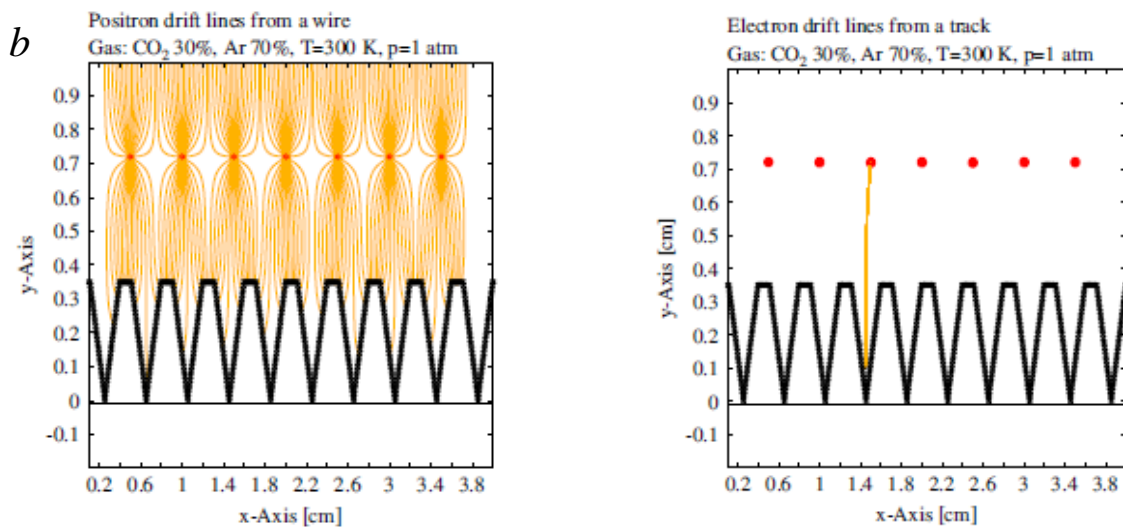


Рис. 1.1.8.10. Многопроволочная пропорциональная камера MWPC, одним из катодов которой является структурированная подложка с тонким слоем конвертора из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

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

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

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

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

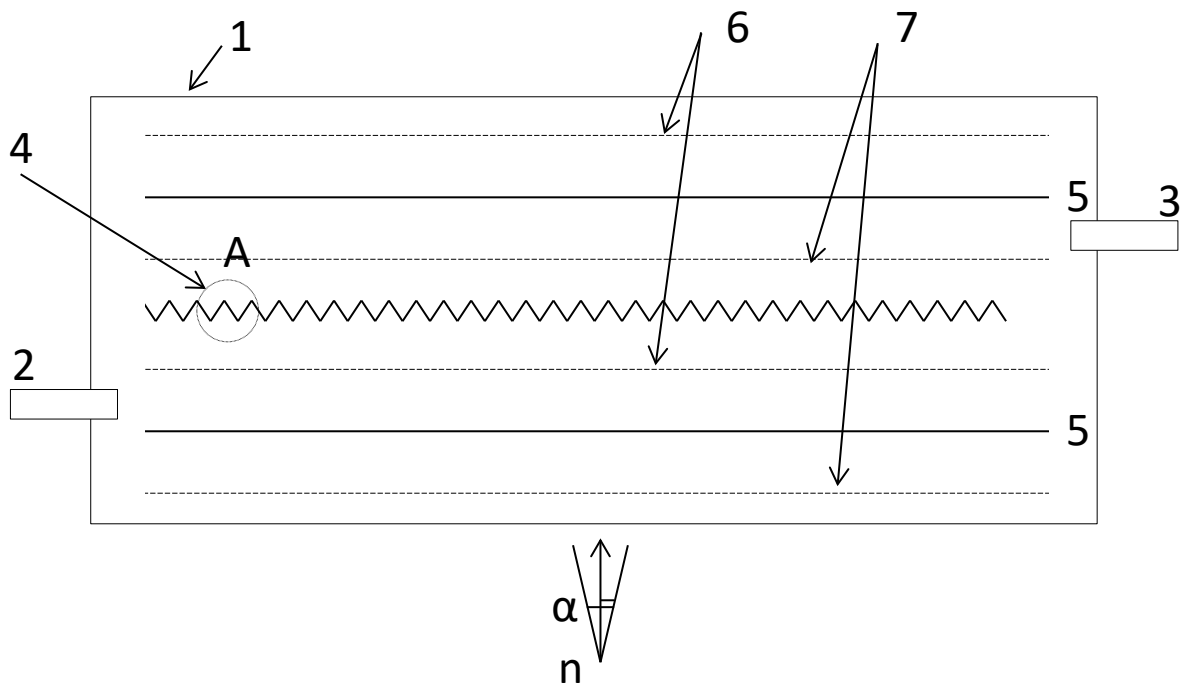


Рис. 1.1.8.11. Сдвоенная многопроволочная пропорциональная камера 5 с твердотельным конвертором $^{10}\text{B}_4\text{C}$, напыленным с двух сторон на общий дрейфовый электрод 4 структурированной формы [1.1.8.13]; 1 – корпус, 2, 3 – газовые патрубки вход-выход; 6, 7 – проволочные катоды (XY-координаты).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

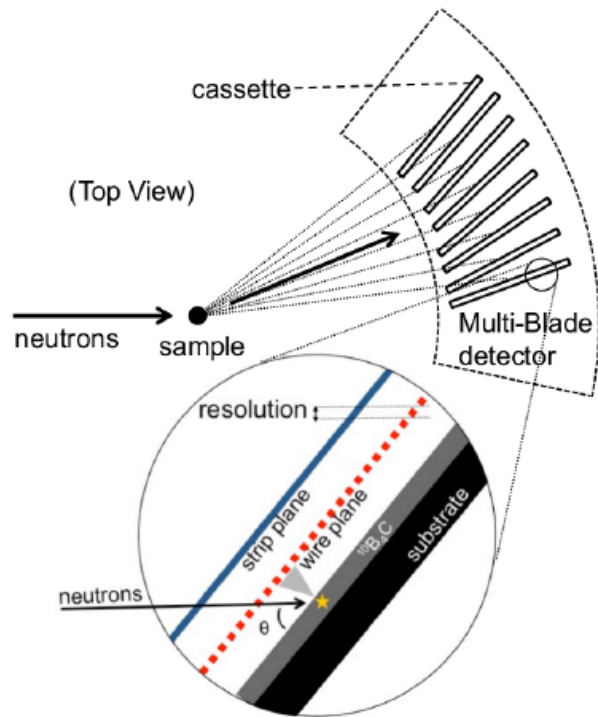


Рис. 1.1.8.12. Размещение пластинок с тонкопленочным конвертером под малым углом к траектории нейтрона в геометрии типа “жалюзи”, принцип Multi-Blad [1.1.8.14, 1.1.8.15].

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

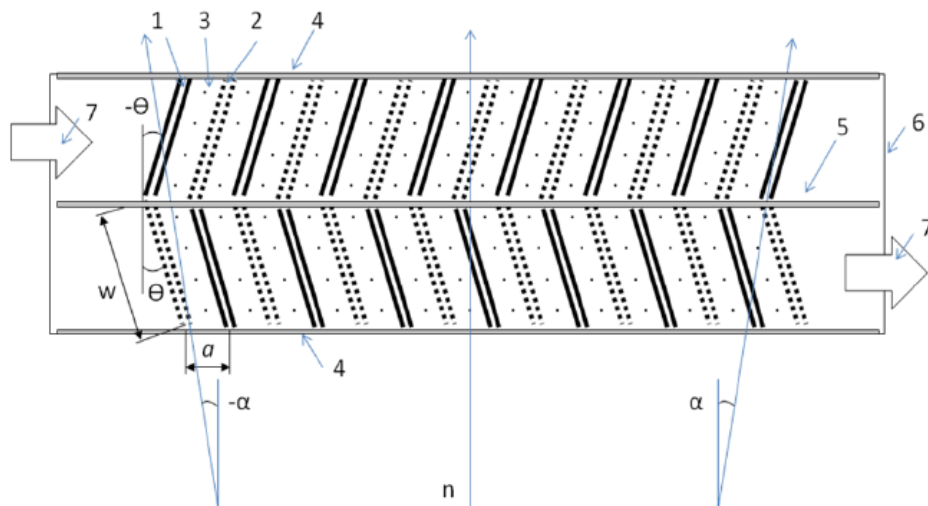


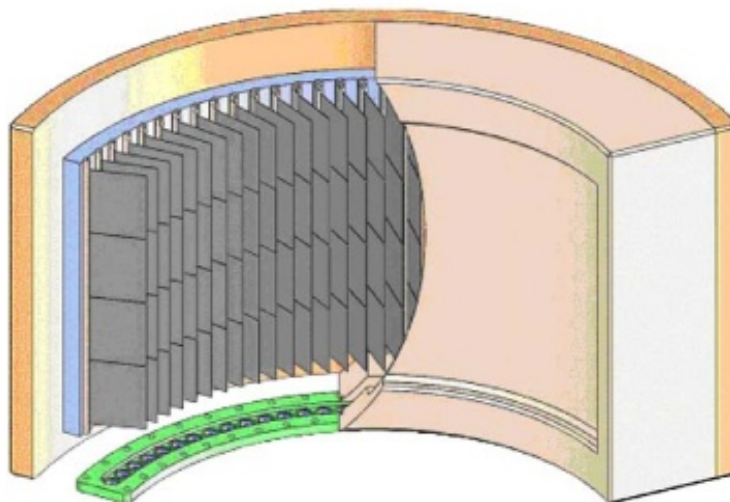
Рис. 1.1.8.13. Конструкция типа “шеврон” 2D-детектора т.х.н. с тонкопленочным конвертором $^{10}\text{B}_4\text{C}$, напыленным с двух сторон на пластинки-подложку [1.1.8.16].

Позиционно-чувствительные детекторы на газонаполненных микроstriповых счетчиках MSGC

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

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

a



b

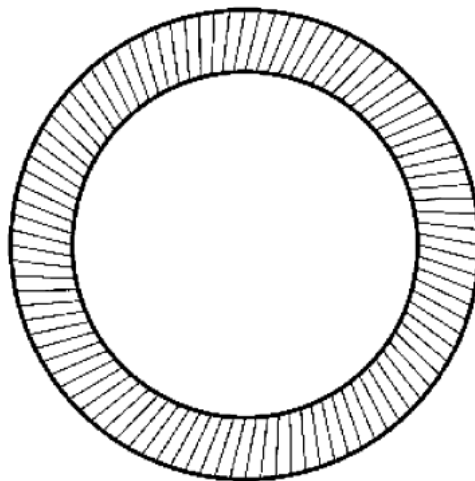


Рис. 1.1.8.14. Геометрия «жалюзи» на микростриповых детекторах MSGC.

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

В составе MPGD⁸ выделяются два основных класса детекторов:

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

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

Применение GEM для регистрации т.х.н.

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

⁸ <https://rd51-public.web.cern.ch/>

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

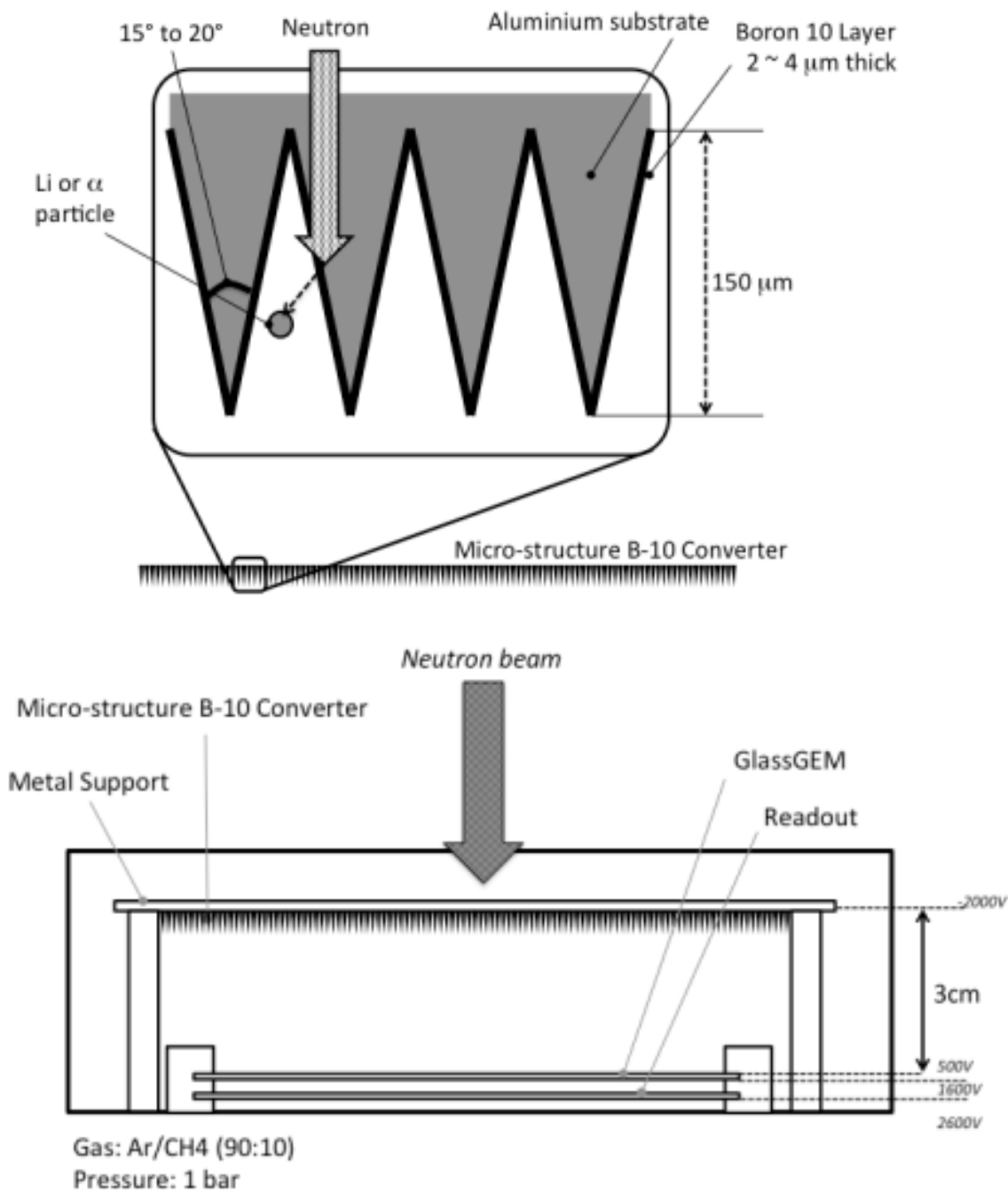


Рис. 1.1.8.15. Микроструктурированная алюминиевая подложка с нанесенным на ее поверхность с одной стороны тонкопленочным конвертором ^{10}B толщиной 2-4 μm (a) выполняет функцию дрейфового электрода GEM-детектора с рабочим зазором 30 мм (b), ниже GEM расположен считывающий электрод, при помощи которого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

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

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

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

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

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

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

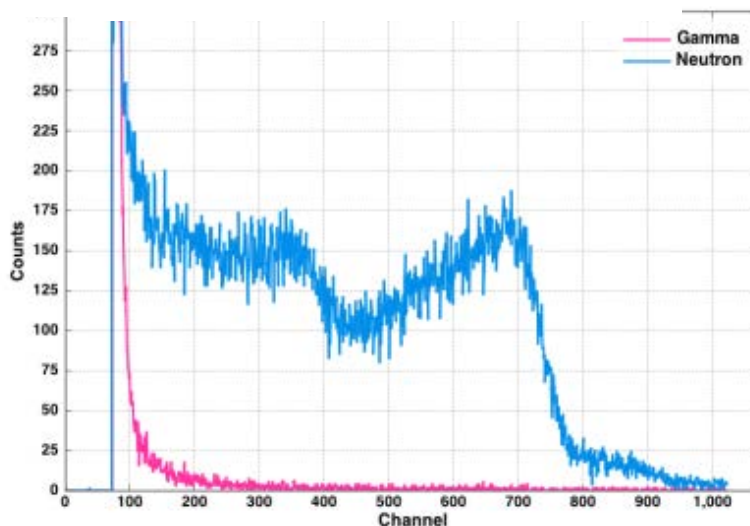


Рис. 1.1.8.16. Амплитудные спектры от тепловых нейтронов и гамма-фона для толщины пленки конвертора 2 \mu m с углом при вершине микроструктурной подложки $2\alpha=15^\circ$.

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

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

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

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

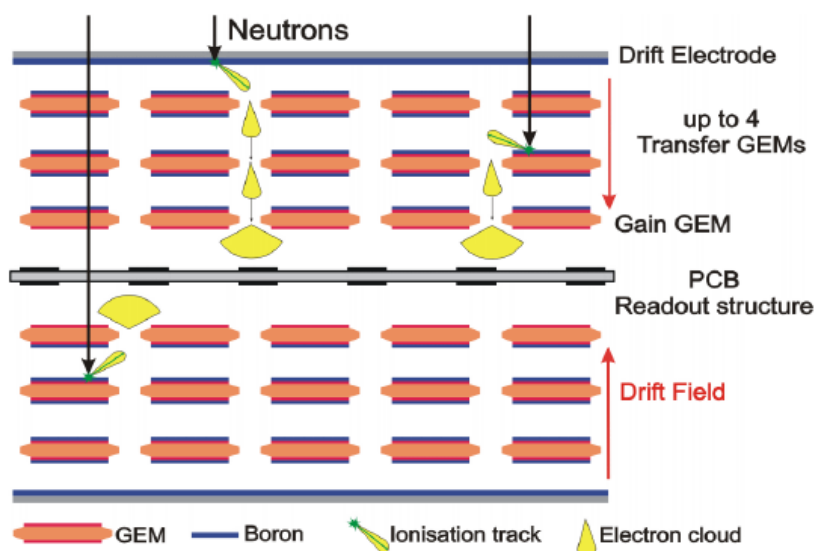


Рис. 1.1.8.17. Детектор т.х.н. CASCADE, выполненный на тонкопленочных конверторах ^{10}B , число слоев которых выбирается по необходимой эффективности регистрации нейтронов.

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

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

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

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

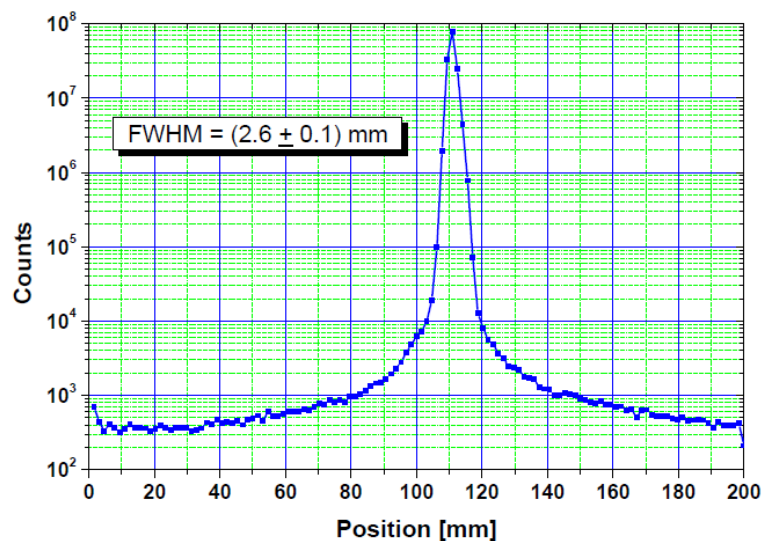


Рис. 1.1.8.18. Пространственное разрешение детектора т.х.н. CASCADE.

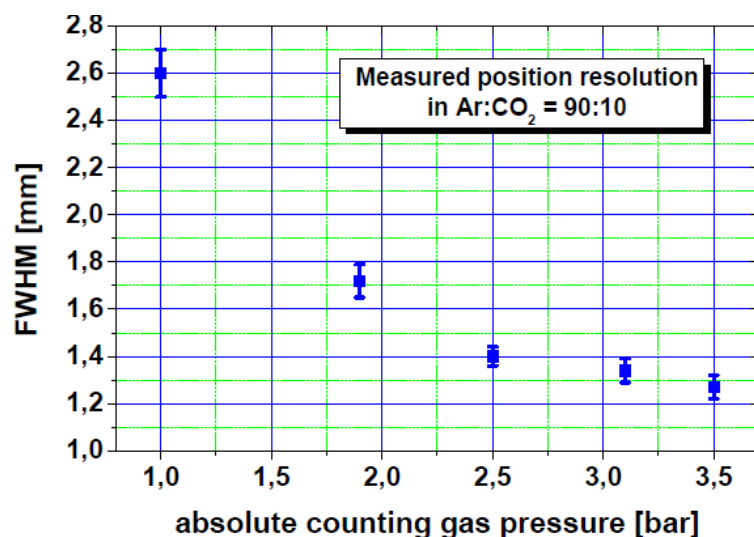


Рис. 1.1.8.19. Улучшение пространственного разрешения детектора CASCADE с увеличением давления газовой смеси.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

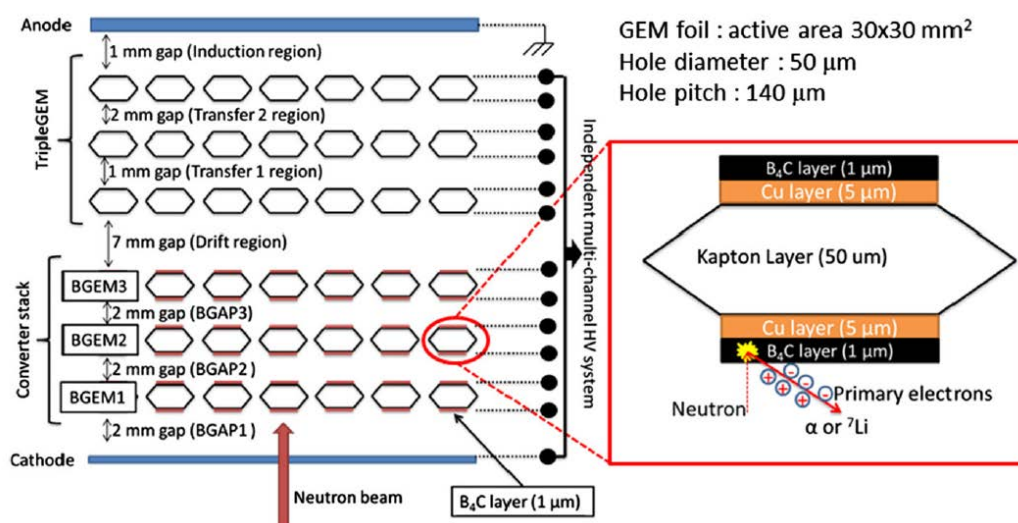


Рис. 1.1.8.20. Детектор т.х.н. MBGEM, выполненный на тонкопленочных конверторах толщиной 1 μm из карбида бора, обогащенного изотопом ^{10}B до 95%, с шестью слоями [1.1.8.24].

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

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

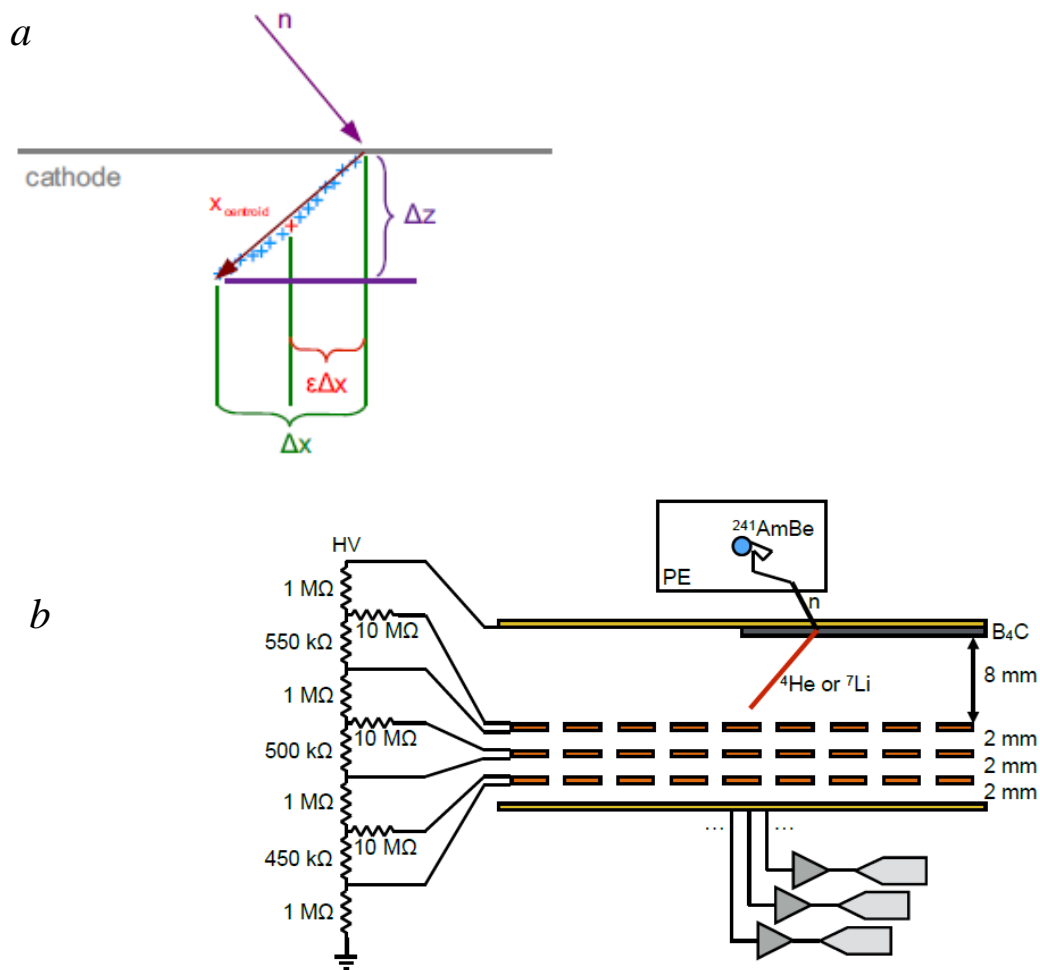


Рис. 1.1.8.21. Схема регистрации трех координат X, Y, Z точки захвата нейтрона в пленочном конверторе ^{10}B (a) по наклону треков и устройстве для реализации на Triple-GEM детекторе (b) [1.1.8.27], достаточно информации с трех смежных каналов.

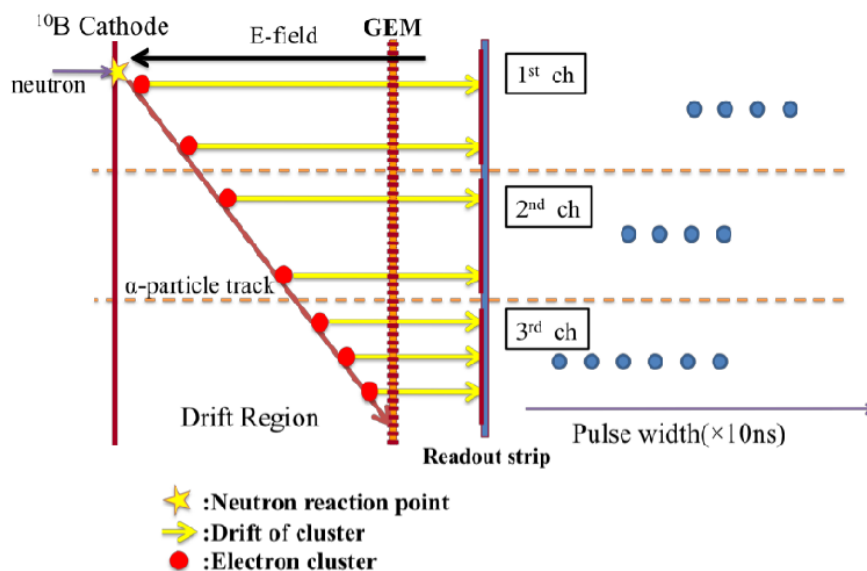


Рис. 1.1.8.22. Схема регистрации трех координат X, Y, Z точки захвата нейтрона в пленочном конвертере ^{10}B по наклону треков с использованием GEM-детектора [1.1.8.28].

Применение ММ для регистрации т.х.н.

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

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

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

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

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

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

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

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

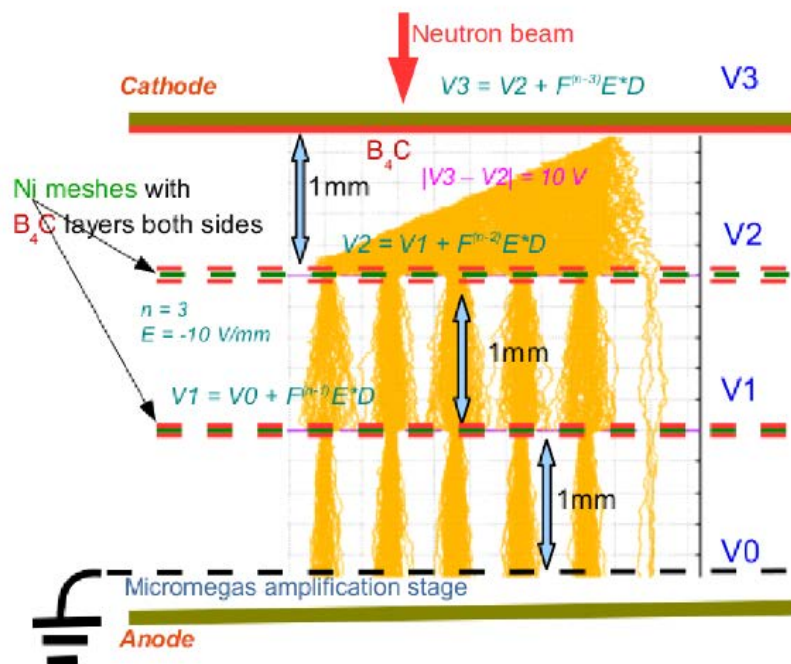


Рис. 1.1.8.23. Многослойный детектор т.х.н.с применением ММ [1.1.8.29].

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

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

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

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

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

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

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

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

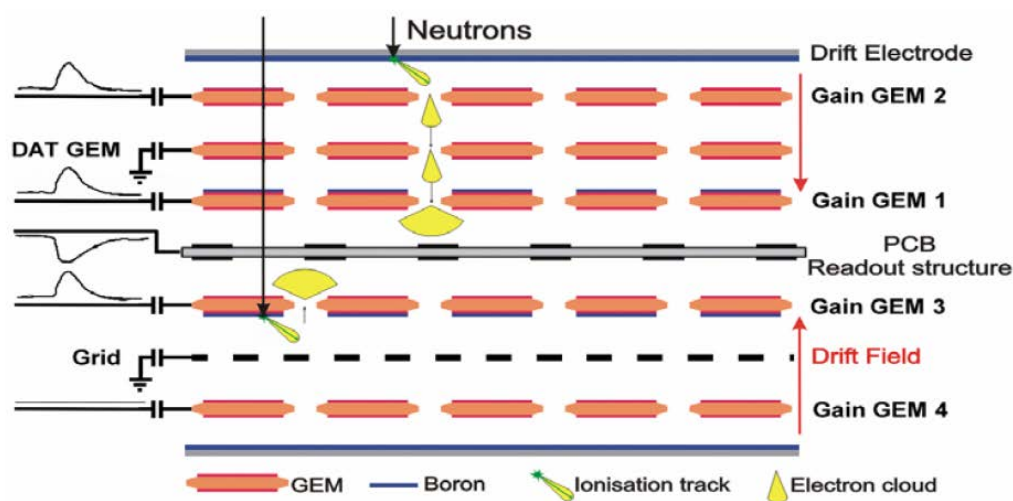


Рис. 1.1.8.24. Детектор CASCADE-MIEZE, выполненный на тонкопленочных конверторах ^{10}B , определяющий номер “сработавшего” слоя с твердотельным конвертором ^{10}B [1.1.8.31].

Зазоры между GEM – 2 mm.

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

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

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

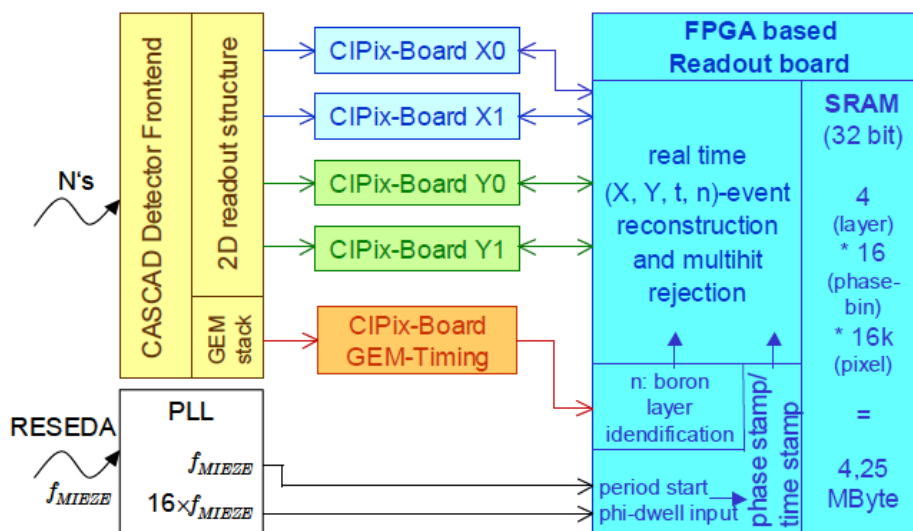


Рис. 1.1.8.25. Блок-схема электроники детектора, выполненная на 64-канальных чипах и программируемой логике (каждый канал обеспечивает счет 330 кГц с 10% просчетами по мертвому времени).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

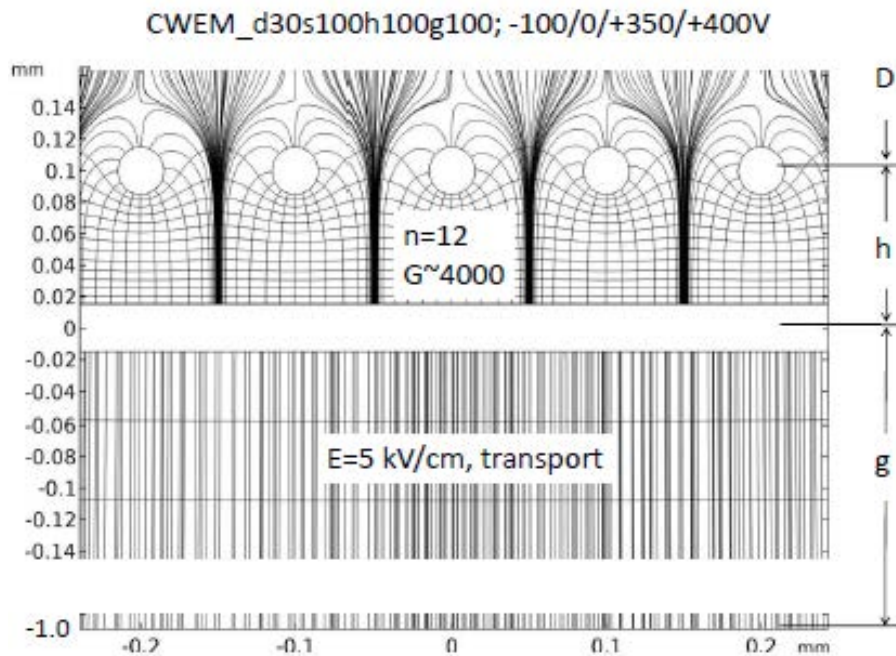


Рис. 1.1.8.26. Линии напряженности и эквипотенциали электрического поля между проволочками МПГЭУ: D – дрейфовый зазор, в котором образуется первичный заряд; h – зазор умножения; g – индукционный зазор [1.1.8.35].

Заклучение

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

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

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

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

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

Приложения.

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

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

Описание прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика

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

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

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

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



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

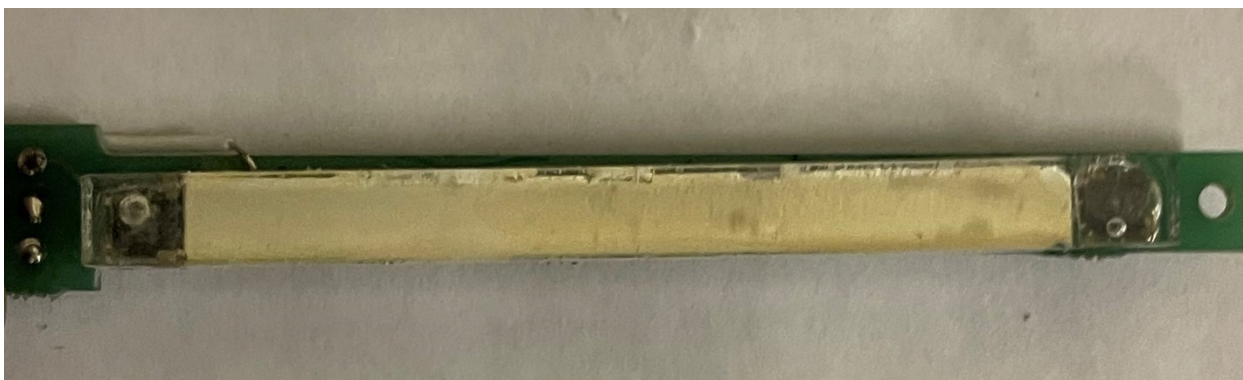


Рис. 1.1.9.2. Прототип одномерного ПЧД на основе сцинтиллятора ZnS/6LiF. Вид сверху.

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

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

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

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

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

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

Проведение испытаний прототипа одномерного позиционно-чувствительного счетчика

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

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

Таблица 1.1.9.1. Технические характеристики сцинтилляционного ПЧД

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

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

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

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

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

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

Проведение эксперимента для одномерного позиционно-чувствительного счетчика

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

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

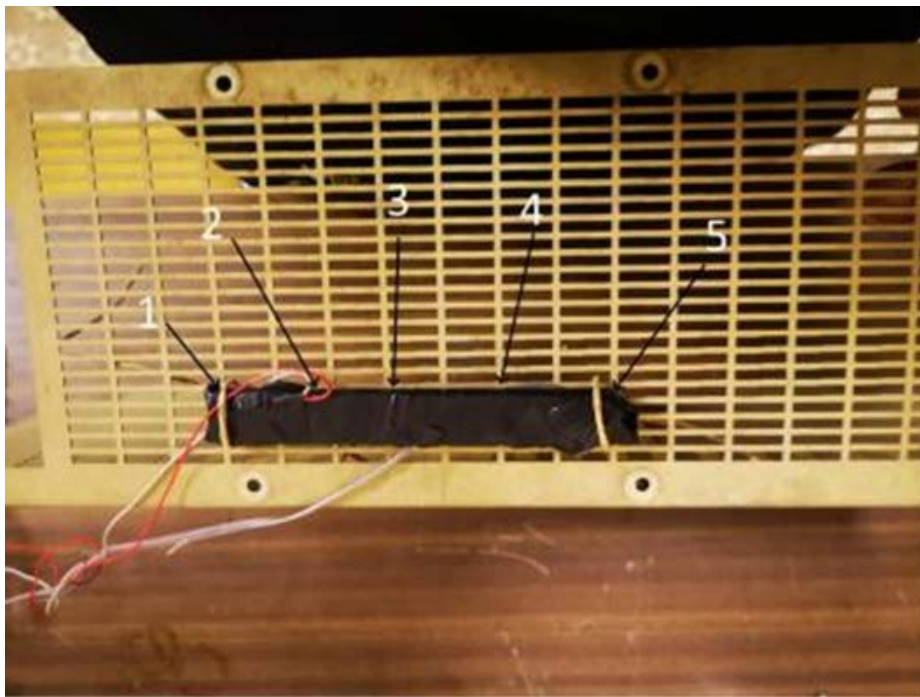


Рис. 1.1.9.3. Точки для проведенных измерений.

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

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

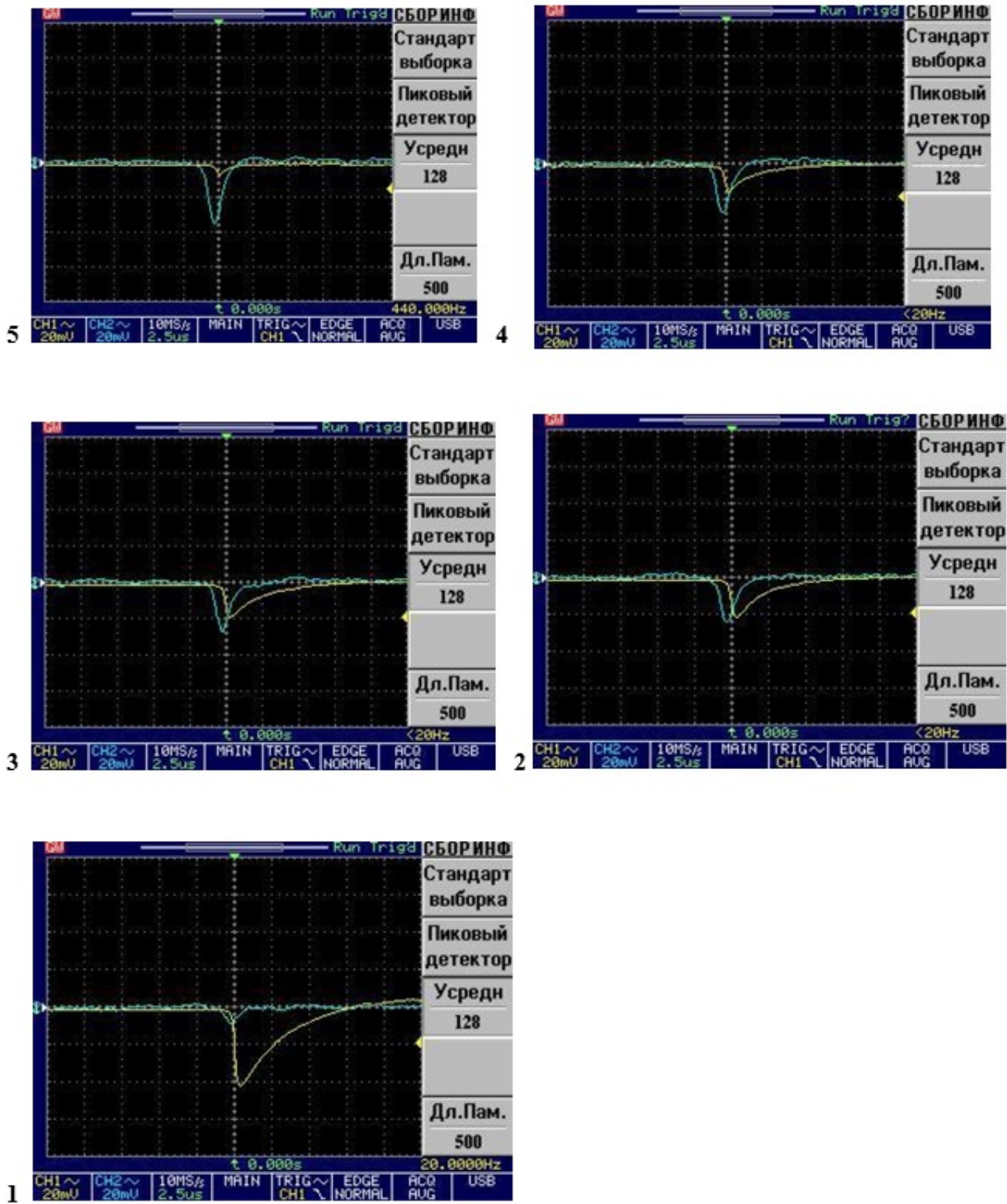


Рис. 1.1.9.4. Обозначение на рисунках соответствуют точка измерения на рисунке 1.1.9.3.

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

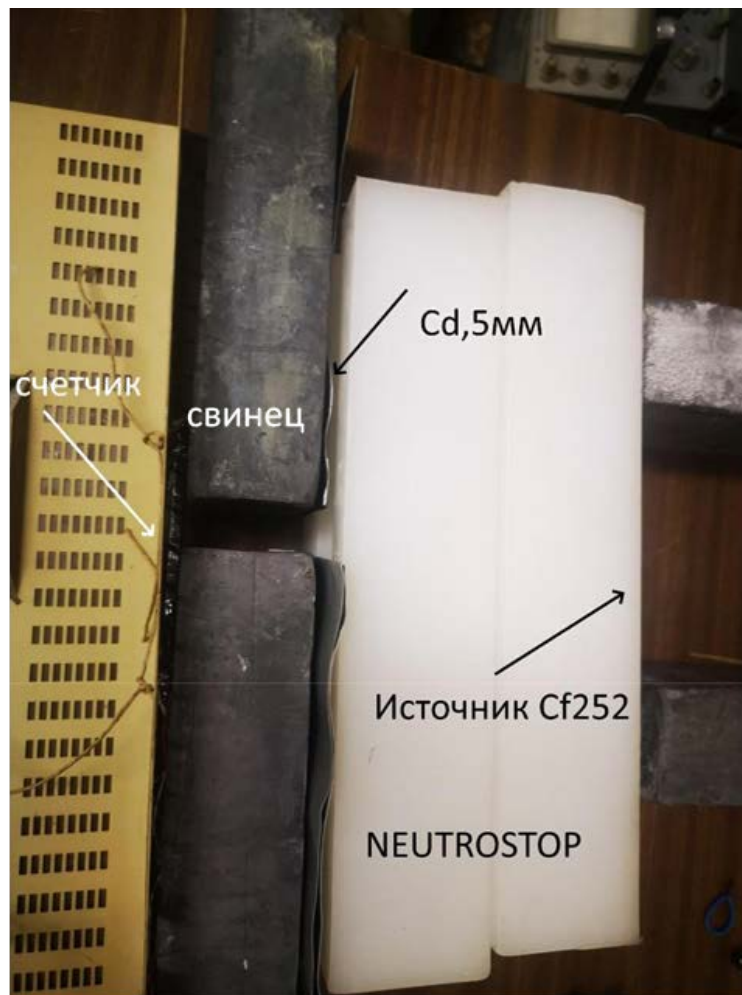


Рис. 1.1.9.5. Схема размещения элементов для проведения эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

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

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

Приложение.

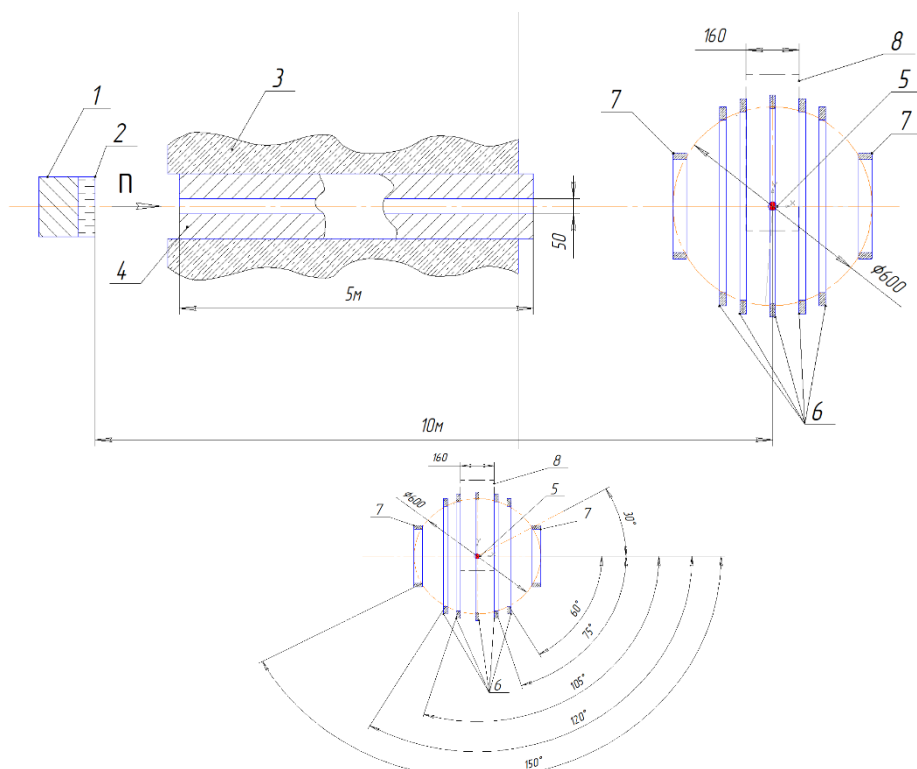
1. Конструкторская документация. Файл Прилож.1.1.9_1.pdf
2. Акт изготовления. Файл Прилож.1.1.9_2.pdf
3. Программа испытаний Файл Прилож.1.1.9_3.pdf
4. Акт и протокол испытаний Файл Прилож.1.1.9_4.pdf
5. Отчет Файл Прилож.1.1.9_5.pdf

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

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

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

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



РАН. Общий вид дифрактометра приведен на рис. 1.1.10.1.

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

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

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

Сцинтилляционный счетчик нейтронов

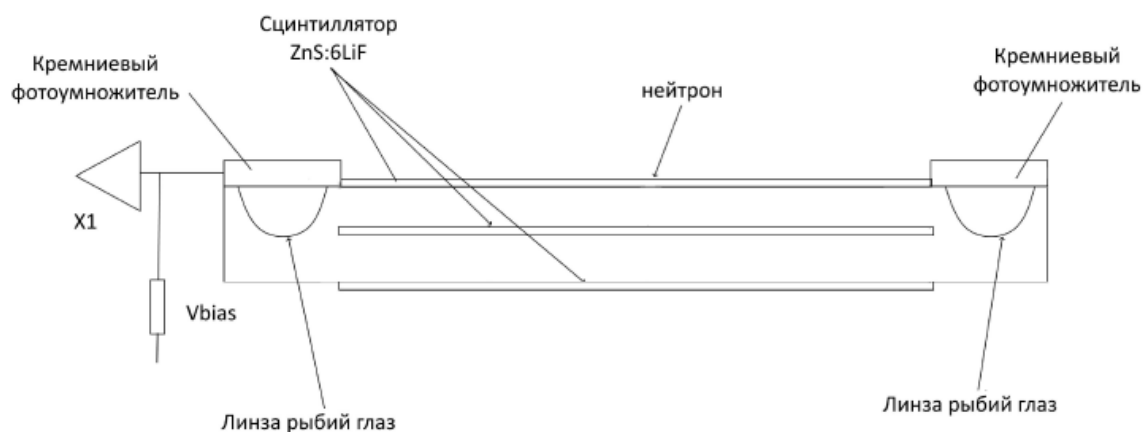


Рисунок 1.1.10.2 – блок схема сцинтилляционного детектора

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

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

Предварительный расчет разрешения дифрактометра

Разрешение времяпролетного дифрактометра определяется соотношением

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

где τ — длительность нейтронного импульса¹

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

λ — длина волны нейтрона

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

θ — угол рассеяния

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

R — расстояние от образца до детектора

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

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

для сцинтилляторов, расположенных параллельно оси пучка, и

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

для сцинтилляторов, расположенных перпендикулярно оси пучка.

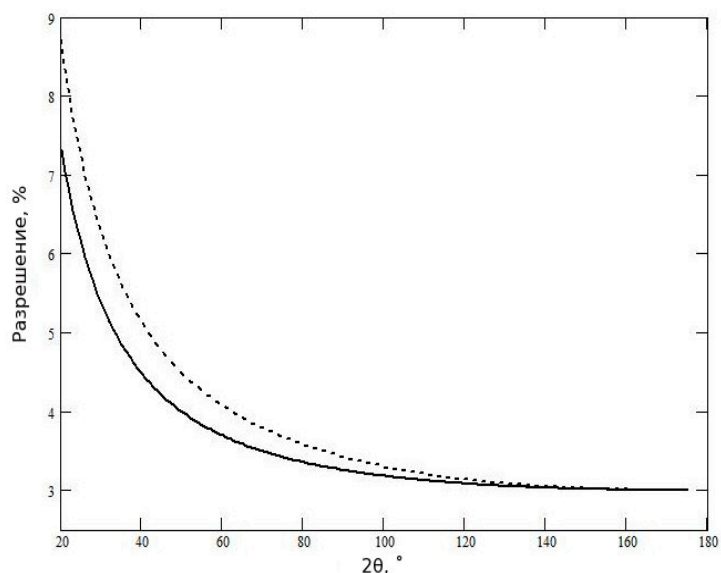


Рисунок 1.1.10.3 — Зависимость разрешения дифрактометра от угла рассеяния. Ширина детектора 5 мм (пунктир) и 10 мм (сплошная кривая). Диаметр кольца 300 мм, сцинтилляторы параллельно оси пучка. Так же были рассчитаны параметры и при другом радиусе кольца

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

Моделирование

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

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

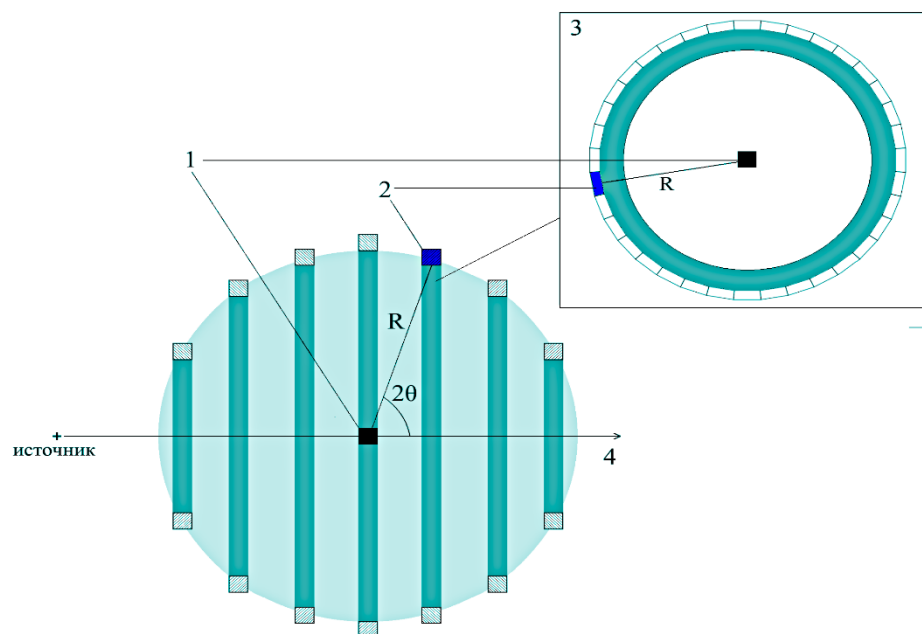


Рисунок 1.1.10.4 — Конфигурация детектора “СФЕРА”, синим цветом выделен счетчик, рассматриваемый в модели: 1 - образец, 2 - нейтронный счетчик, 3 - кольцевой детектор

Моделирование нейтронного счетчика

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

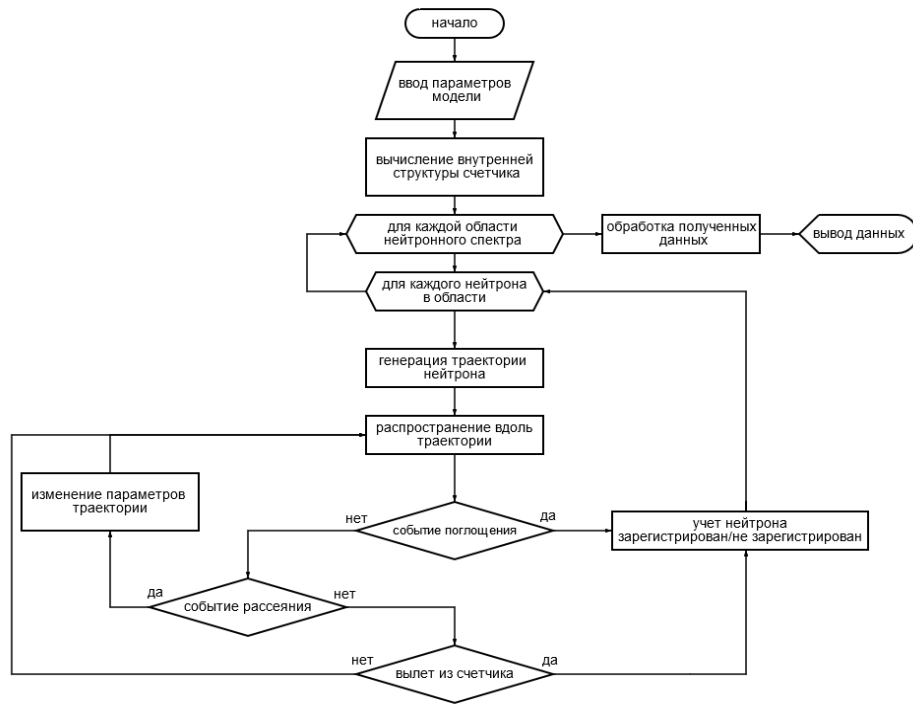


Рисунок 1.1.10.5 — Блок-схема программы на языке Python, моделирующей прохождение нейтронов через сегмент кольцевого детектора

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

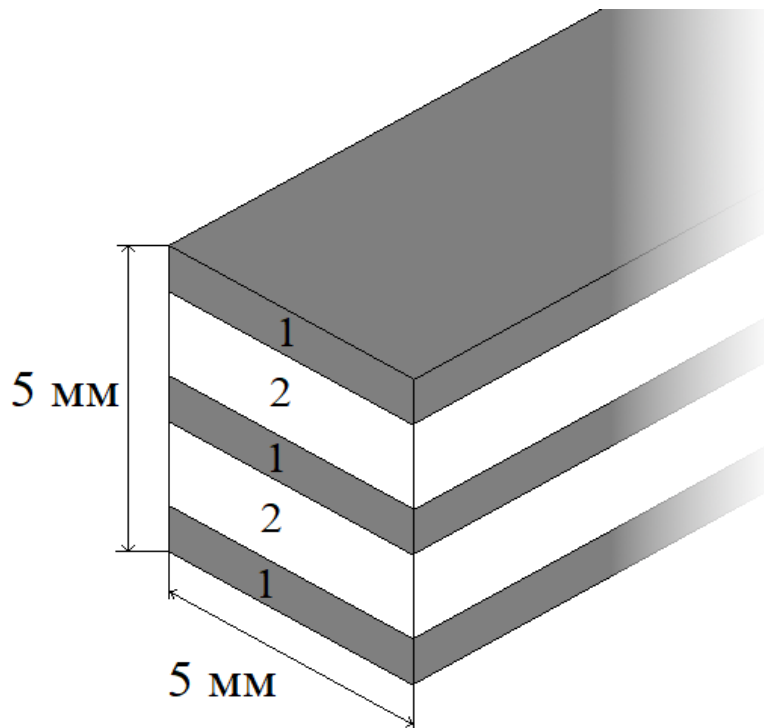


Рисунок 1.1.10.6 — Вид сечения счетчика нейтронов, рассматриваемый в модели:
 1 - слой сцинтилляционного материала ${}^6\text{Li}$, 2 - слой ПММА световода

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

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

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

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

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

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

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

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

где V — модуль вектора скорости рассеянного нейтрона

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

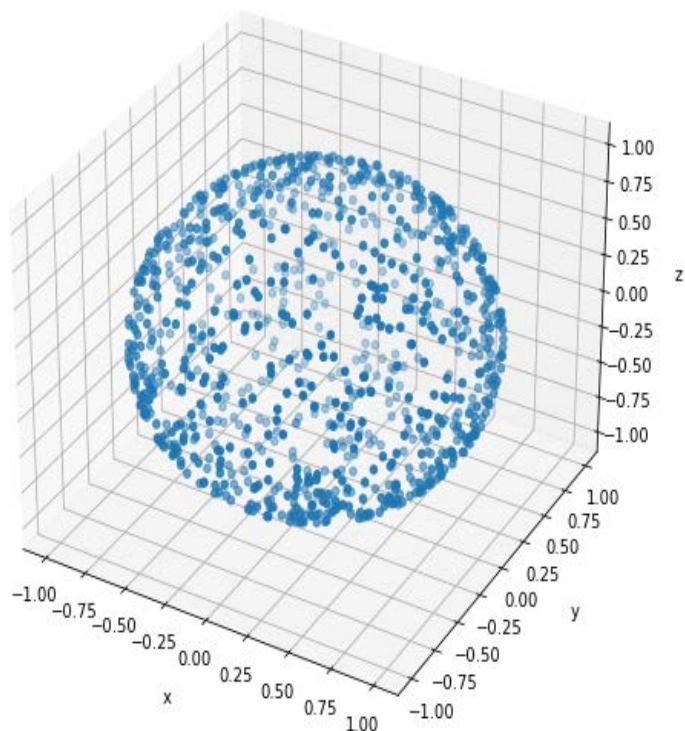
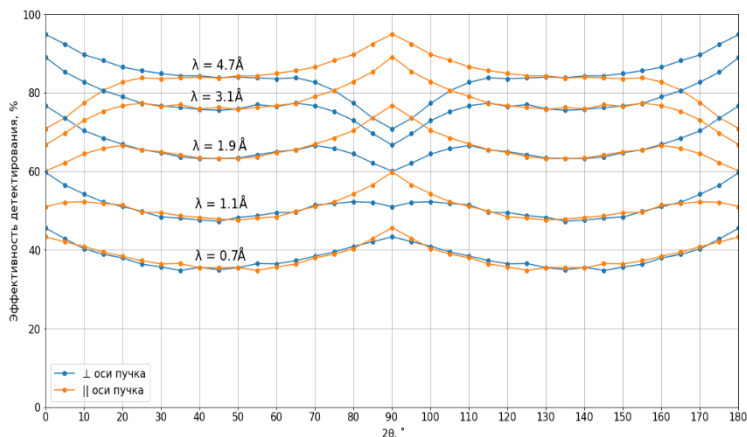


Рисунок 1.1.10.7 — Пример сгенерированного алгоритмом программы равномерного распределения векторов направлений рассеянных нейтронов. Точками обозначены концы соответствующих векторов с модулем $V = 1$

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



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

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

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

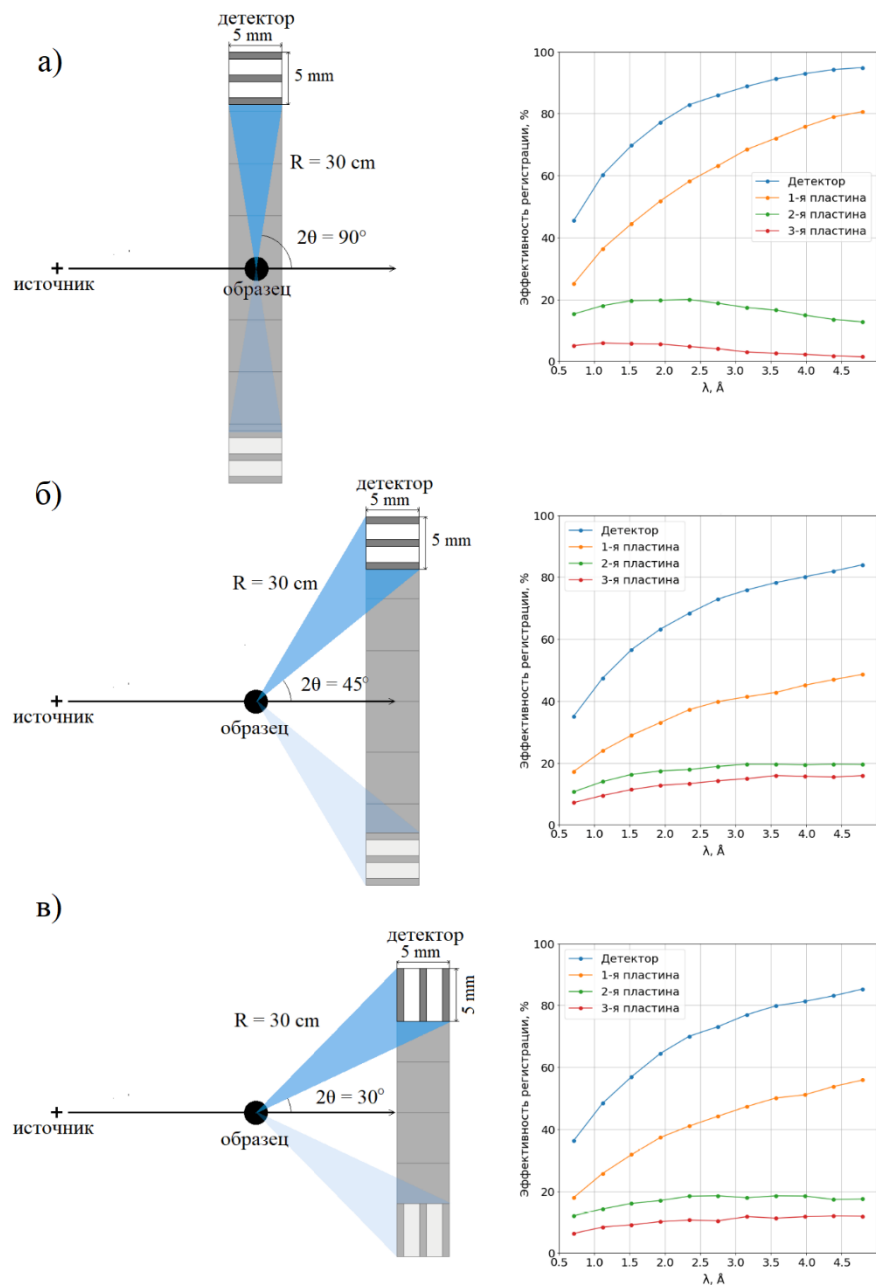


Рисунок 1.1.10.9 — Спектральная эффективность регистрации нейтронов при различных конфигурациях счетчика с двумя слоями сцинтиллятора (R - расстояние образец-детектор, 2θ - угол рассеяния)

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

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

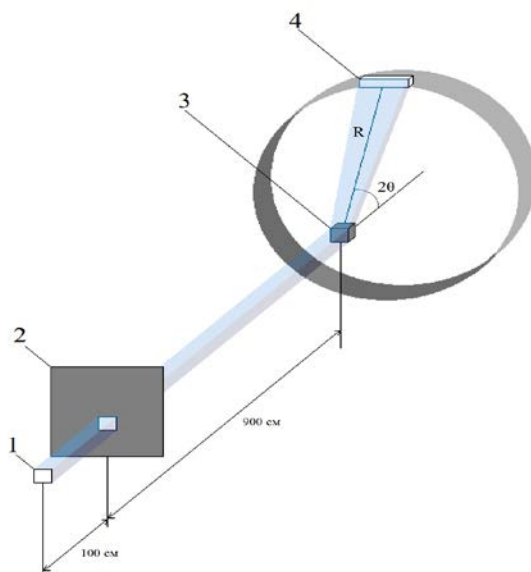
допускается ориентация параллельно оси пучка, которая также является единственной оптимальной на углах $20^\circ < 2\theta < 110^\circ$.

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

Моделирование нейтронного дифрактометра

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

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



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

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

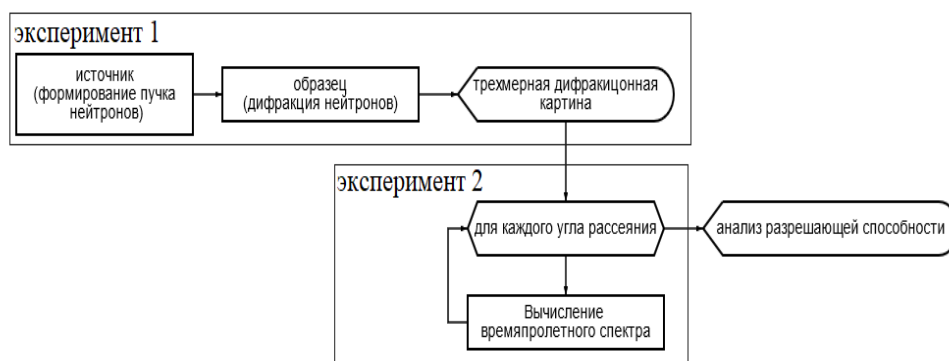


Рисунок 1.1.10.11 — Блок-схема методики модельного эксперимента по дифракции нейтронов, проведенного при помощи программного пакета VITESS

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

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

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

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

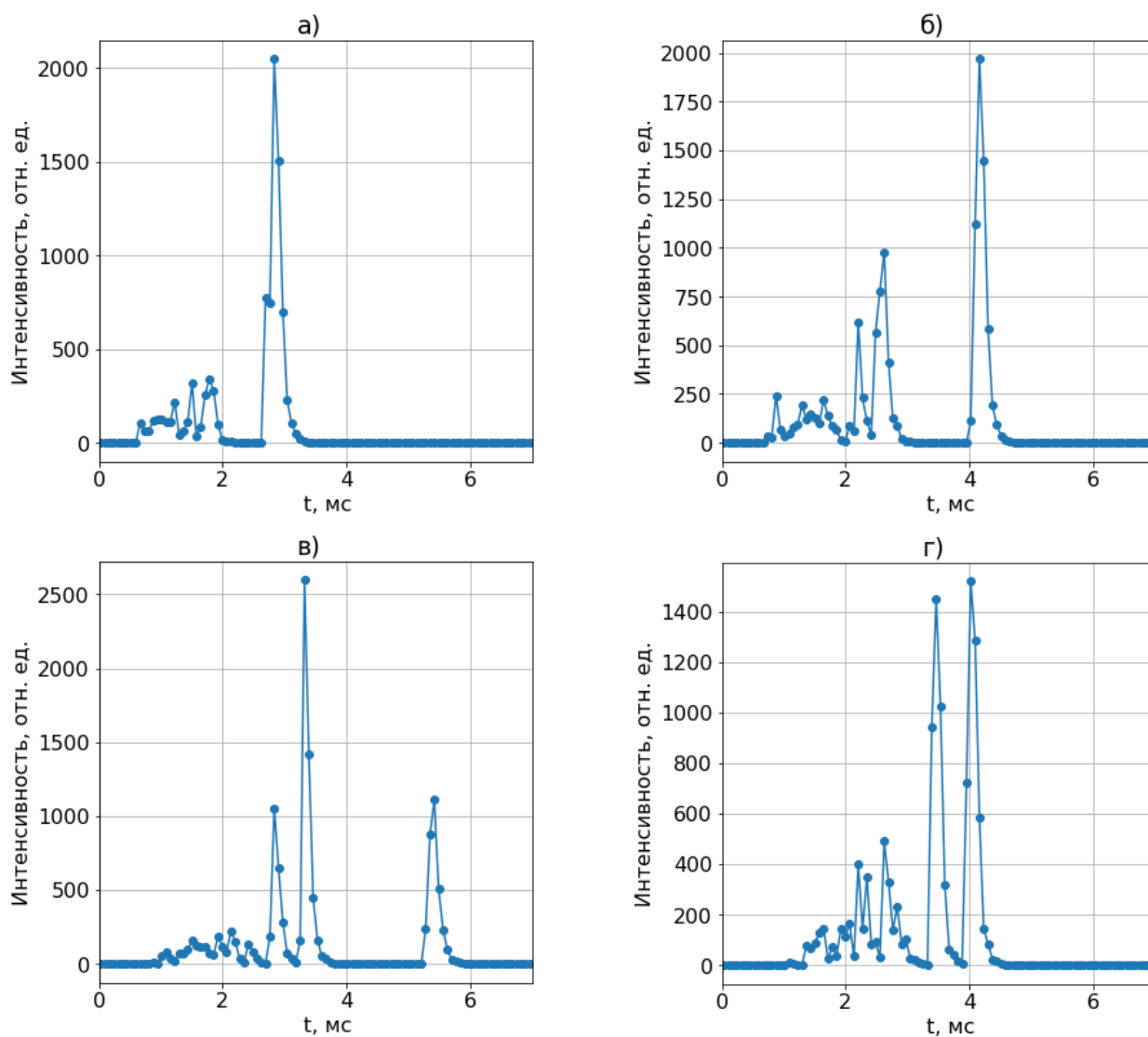


Рисунок 1.1.10.12 — Модельные времяпролетные спектры нейтронов, рассеянных под углами
 а) - 30°, б) - 45°, в) - 60°, г) — 75°

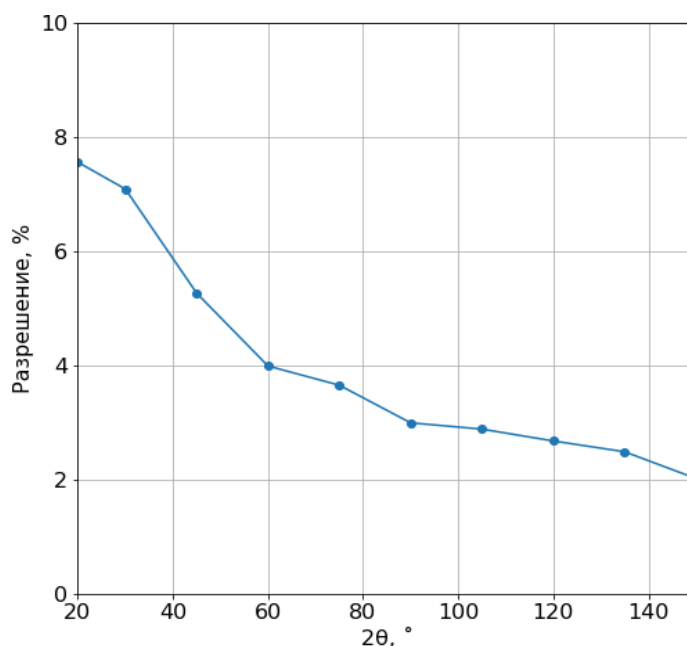


Рисунок 1.1.10.13 — Разрешающая способность нейтронного счетчика как функция угла рассеяния ($30^\circ < 2\theta < 150^\circ$)

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

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

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

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

Заключение

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

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

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

- Следует использовать трехслойные детекторы при любых углах рассеяния для увеличения эффективности регистрации нейтронов.
- Оптимальный радиус сферы – 300 мм. При ширине счетчиков нейтронов 5 мм это позволит сэкономить дорогостоящий материал сцинтиллятора.
- Оптимальная ширина счетчиков нейтронов, образующих кольцевые детекторы, составляет 5 мм, однако на углах рассеяния больше 150° могут использоваться также счетчики шириной до 12 мм.
- Боковые поверхности (ребра) счетчиков могут не закрываться поглощающими нейтроны материалами (например кадмием), т.к. это практически не влияет на разрешение.
- Для достижения максимальной эффективности ориентация счетчиков нейтронов, находящихся на углах рассеяния $2\theta < 20^\circ$ и $2\theta > 160^\circ$, должна соответствовать перпендикулярному расположению плоскостей детектирующих слоев относительно оси подаваемого на образец нейтронного пучка. Для остальных колец допускается ориентация параллельно оси пучка, которая также является оптимальной при углах $20^\circ < 2\theta < 110^\circ$.
- При углах рассеяния менее 30° следует увеличить расстояние образец-детектор до 500 мм чтобы улучшить разрешение.

Приложения

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

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

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

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

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

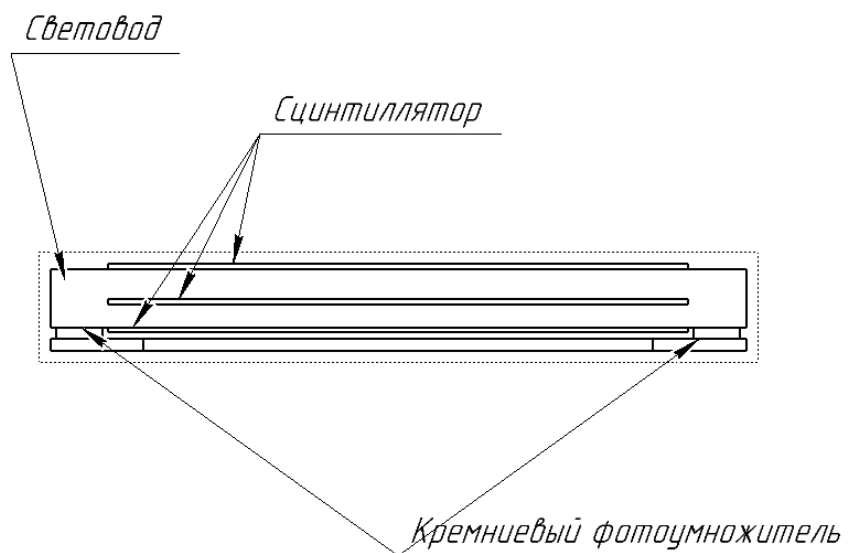


Рисунок 1.1.11.1, принцип построения детектора

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

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

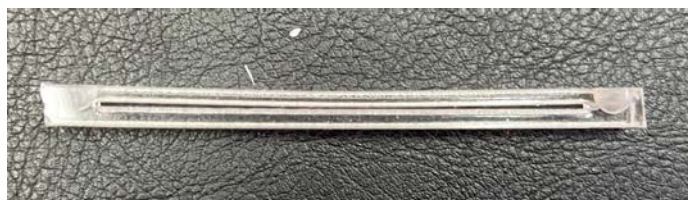


Рисунок 1.1.11.2. Внешний вид

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



Рисунок 1.1.11.3 – внешний вид сцинтиллятора.

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

Приложения

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

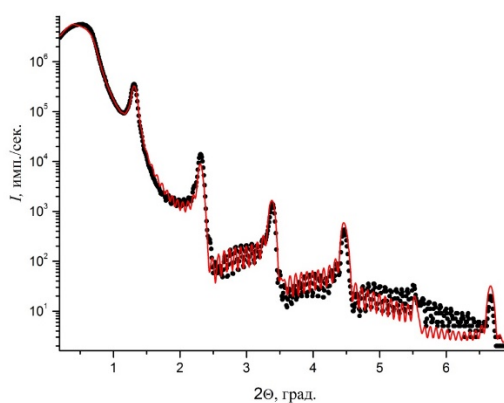


Рисунок 1.1.12.1. Экспериментальные данные (символы) и результат обработки (линия) рентгеновской рефлектометрии для сверхрешётки Fe/Gd (образец №1).

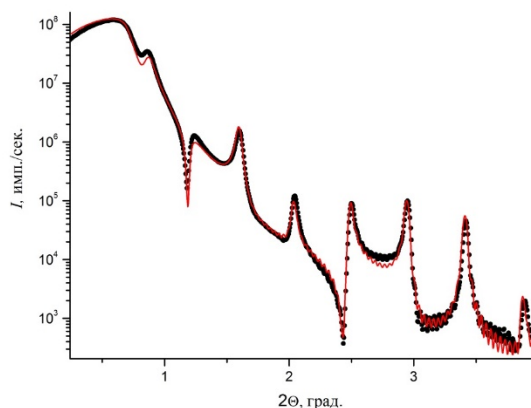


Рисунок 1.1.12.2. Экспериментальные данные (символы) и результат обработки (линия) рентгеновской рефлектометрии для сверхрешётки Fe/Cr(60 Å)/Gd (образец № 5).

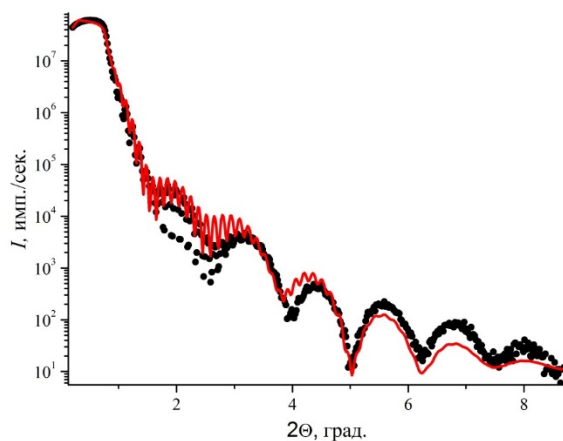


Рисунок 1.1.12.3. Экспериментальные данные (символы) и результат обработки (линия) рентгеновской рефлектометрии для плёнки Gd(600 Å) (образец № 6).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

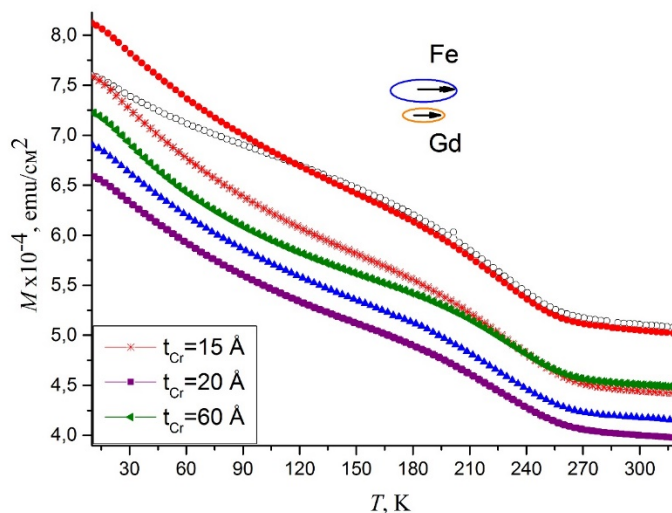


Рисунок 1.1.12.4. Зависимости намагниченности от температуры для образцов № 2 – 5: Fe/Cr(15Å)/Gd, Fe/Cr(20 Å)/Gd, Fe/Cr(60 Å)/Gd, измеренные при $H=500 \text{ Э}$.

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

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

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

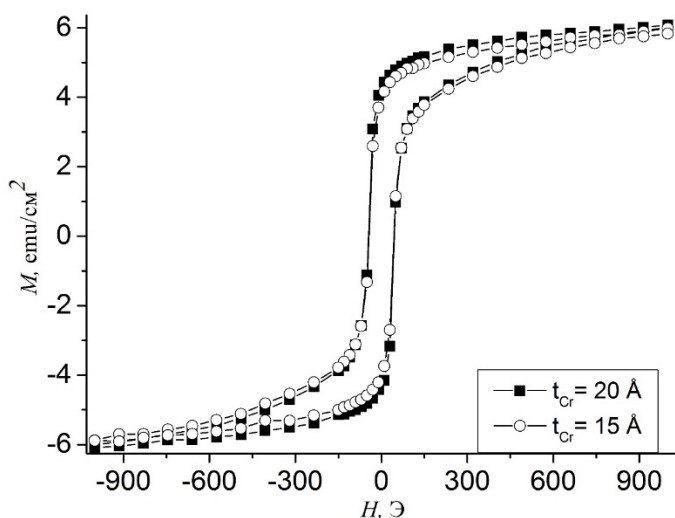


Рисунок 1.1.12.5. Петли гистерезиса для образцов Fe/Cr(t)/Gd с прослойками хрома 15 и 20 Å, измеренные при $T=100 \text{ K}$.

Приложения

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

Работы исследователей в возрасте до 39 лет (при наличии)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Волновая функция представляется в виде суперпозиции падающей и отраженной волн:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Здесь

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Здесь B – матрица коэффициентов отражения:

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

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

Матрица V описывает потенциал взаимодействия в каждом канале:

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

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

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

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

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

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

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

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

Для магнитного рассеяния:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В случае неполяризованных нейтронов формула несколько упрощается:

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

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

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

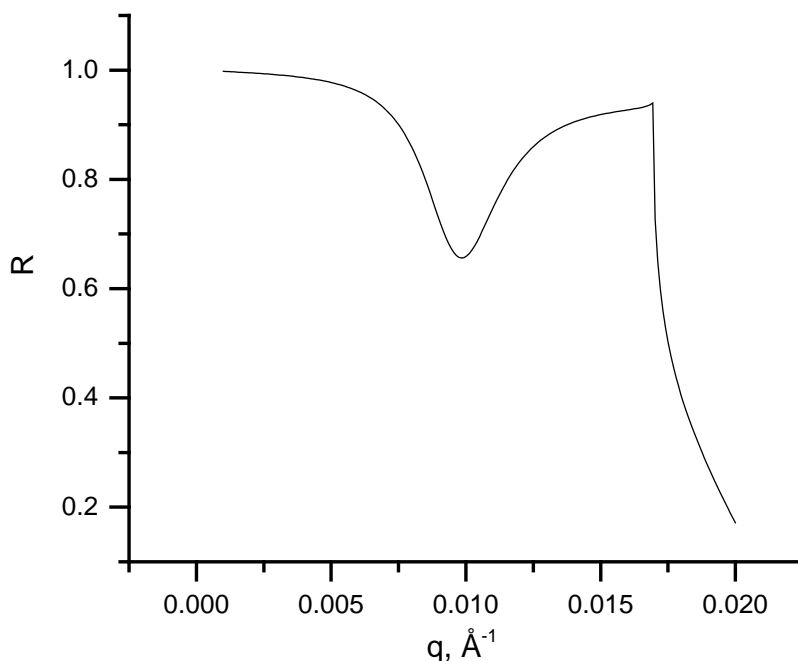


Рисунок 1.1.13.1. Резонансный минимум на полном внешнем отражении в системе $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/^{10}\text{B}_4\text{C}(25 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$

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

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

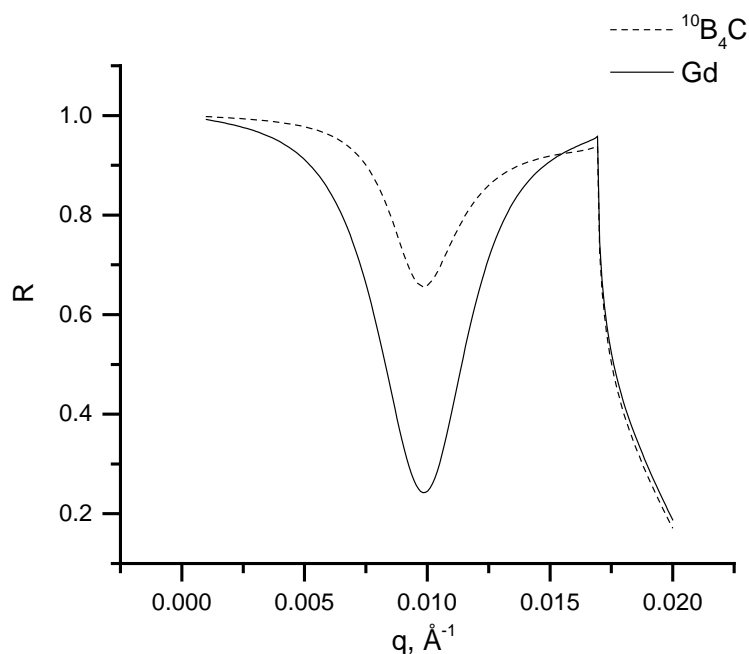


Рисунок 1.1.13.2. Резонансные минимумы на полном внешнем отражении в системах $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{X}(25 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$, где $\text{X} = {}^{10}\text{B}_4\text{C}$, Gd

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

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

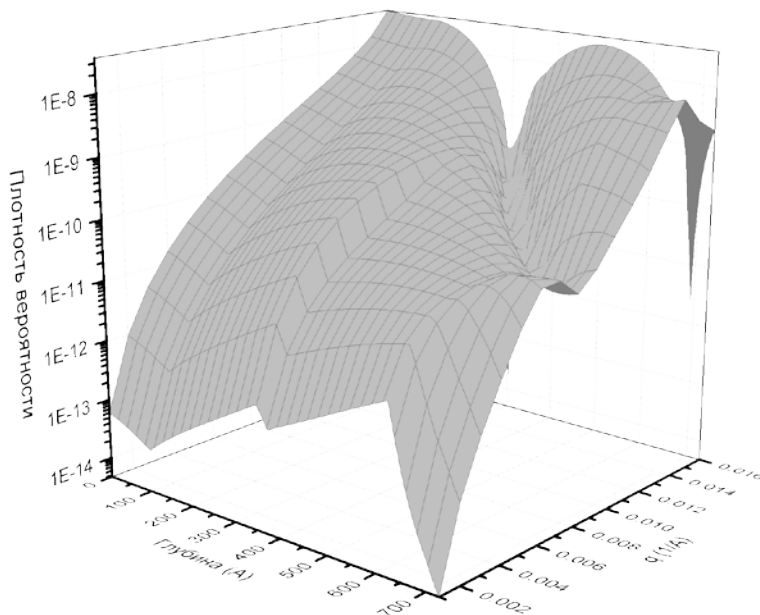


Рисунок 1.1.13.3. Плотность вероятности обнаружить нейтрон в системе $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Gd}(25 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$.

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

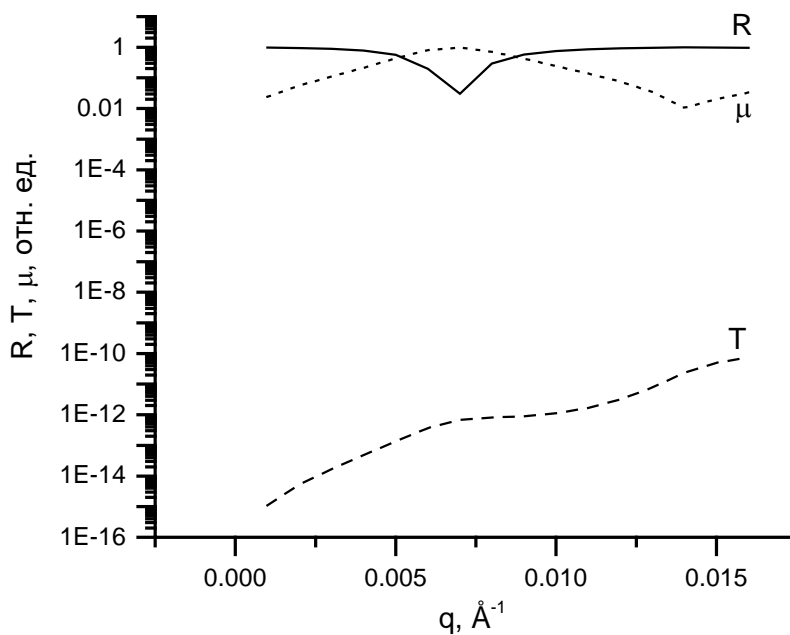


Рисунок 1.1.13.4. Коэффициенты отражения (линия), прохождения (штрих) и поглощения (пунктир) в области полного внешнего отражения.

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

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

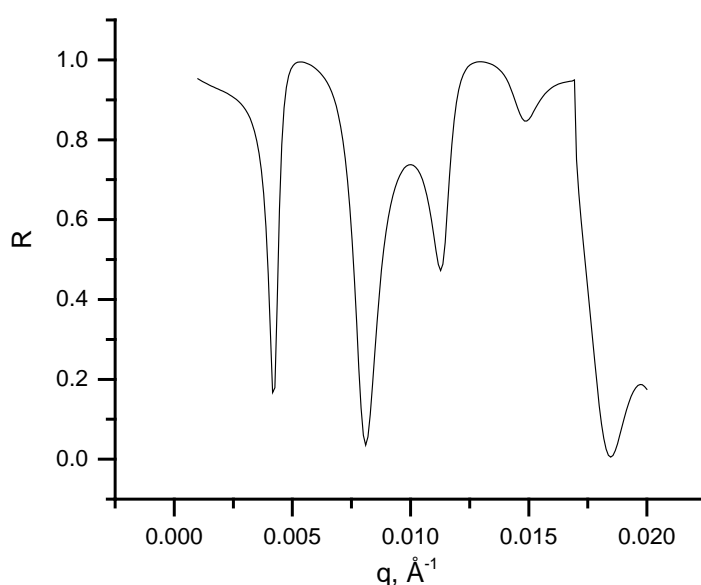


Рисунок 1.1.13.5. Коэффициент отражения для системы $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(1000 \text{ \AA})/\text{Gd}(25 \text{ \AA})/\text{V}(1000 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$ с большим количеством резонансных минимумов.

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

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

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

Приложения

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

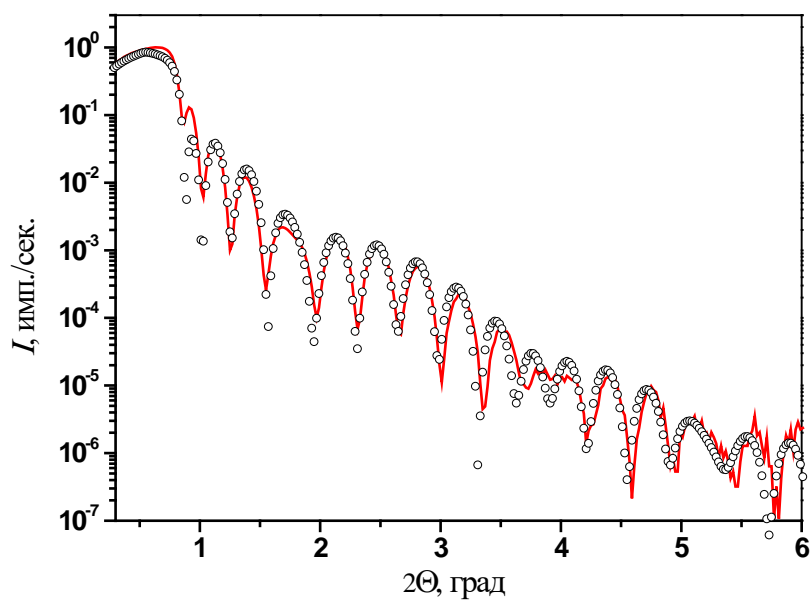


Рисунок 1.1.14.1 – Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 1 (линия из черных символов) измеренная при излучении Си и модельная кривая (красная линия).

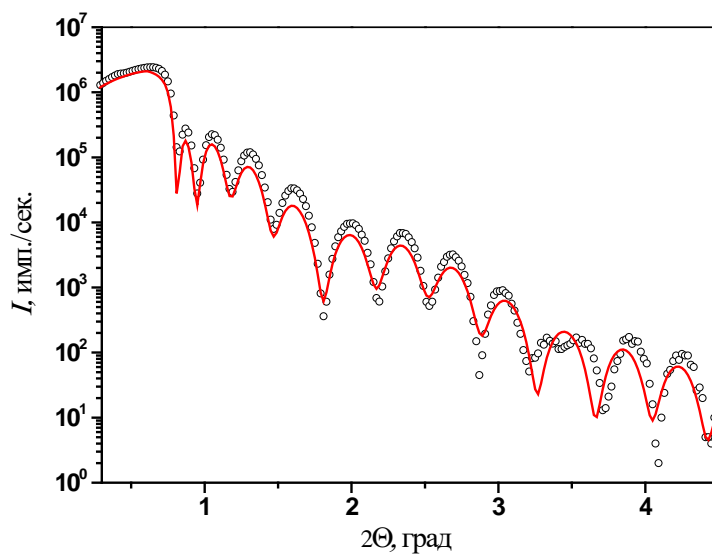


Рисунок 1.1.14.2 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 2 (линия из черных символов) измеренная при излучении Си и модельная кривая (красная линия).

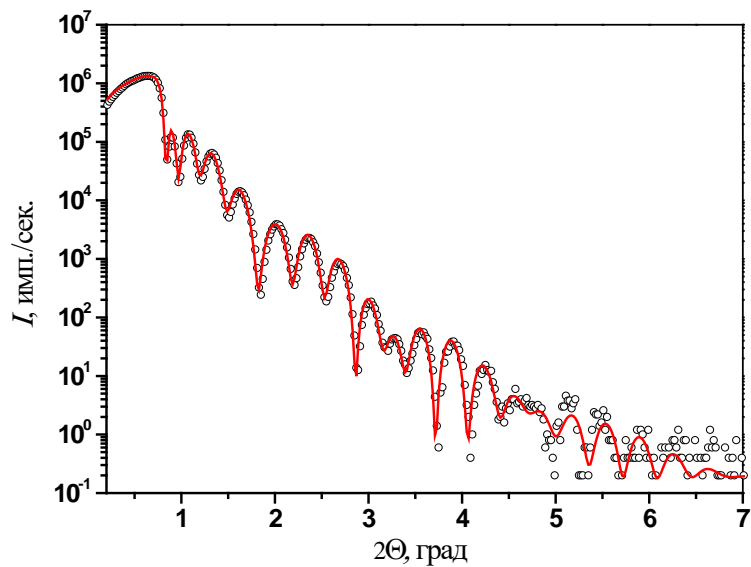


Рисунок 1.1.14.3 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 3 (линия из черных символов) измеренная при излучении Си и модельная кривая (красная линия).

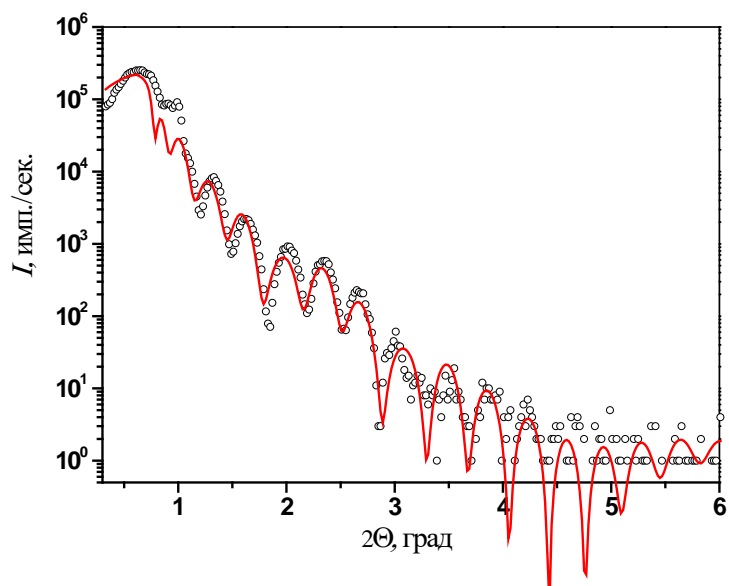


Рисунок 1.1.14.4 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 4 (линия из черных символов) измеренная при излучении Си и модельная кривая (красная линия).

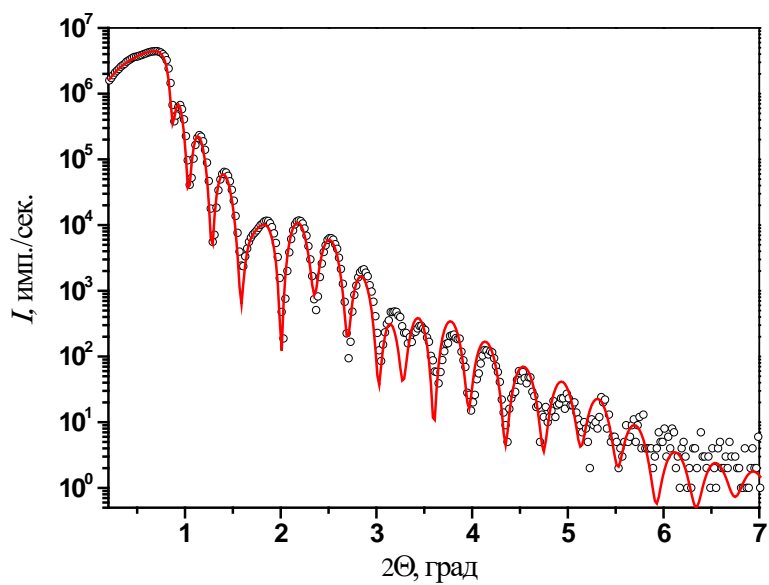


Рисунок 1.1.14.5 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 5 (линия из черных символов) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия).

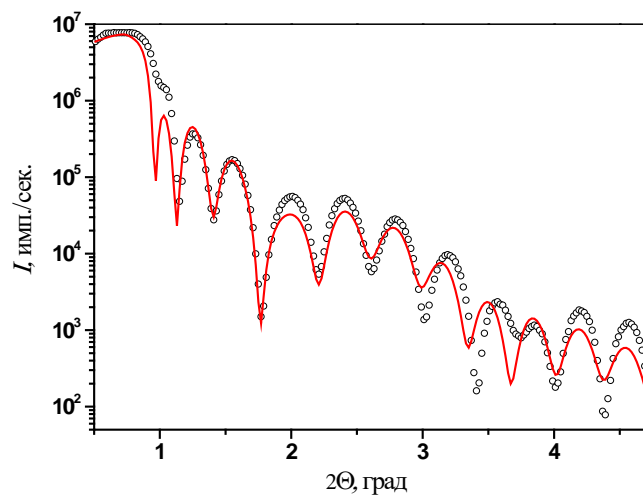


Рисунок 1.1.14.6 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 6 (линия из черных символов) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия).

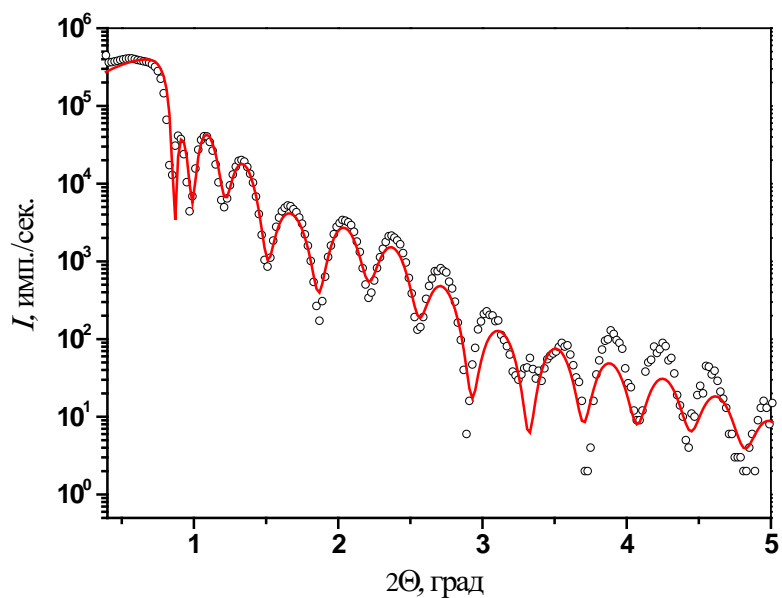


Рисунок 1.1.14.7 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 7 (линия из черных символов) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия).

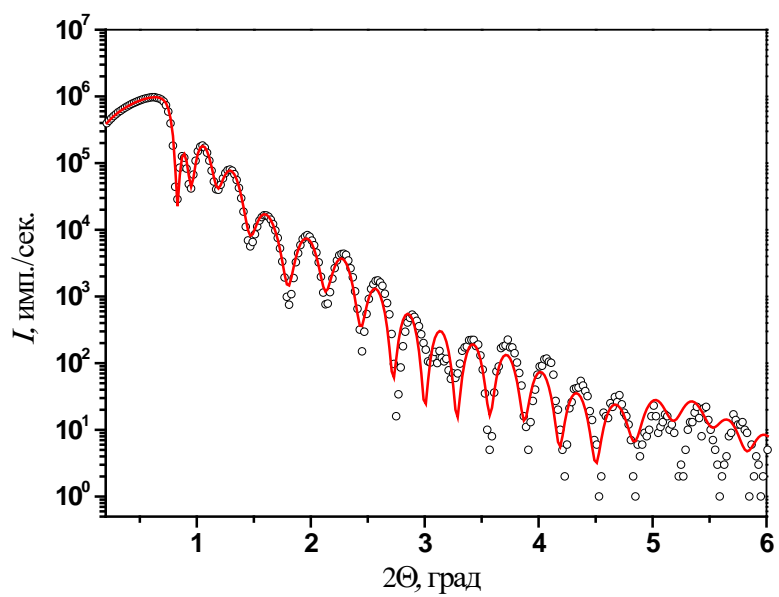


Рисунок 1.1.14.8 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 8 (линия из черных символов) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия).

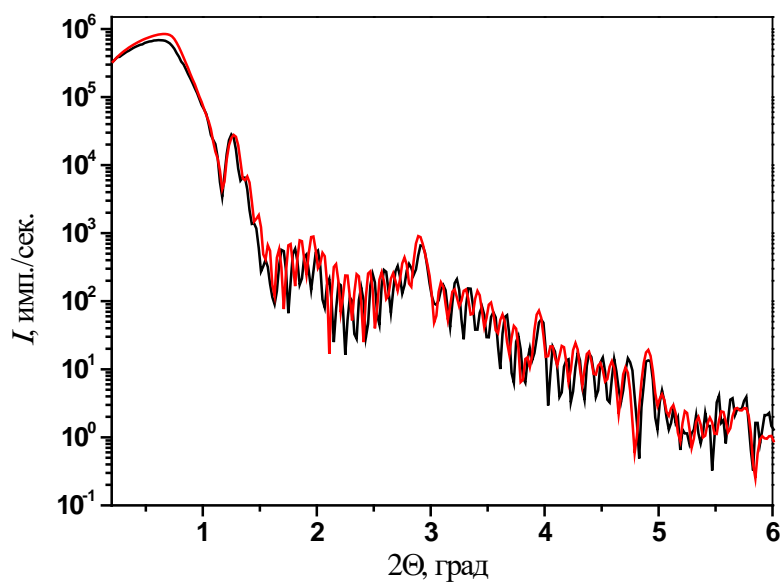


Рисунок 1.1.14.9 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 9 (черная линия) измеренная при излучении Си и модельная кривая (красная линия).

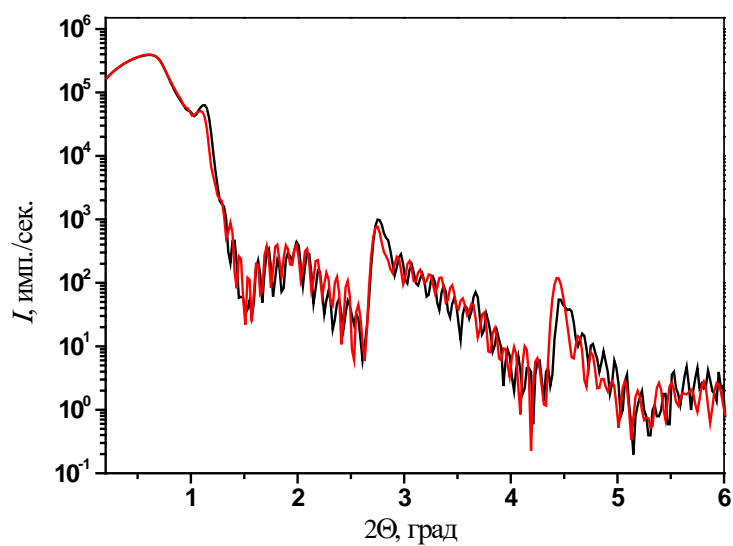


Рисунок 1.1.14.10 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца № 10 (черная линия) измеренная при излучении Си и модельная кривая (красная линия).

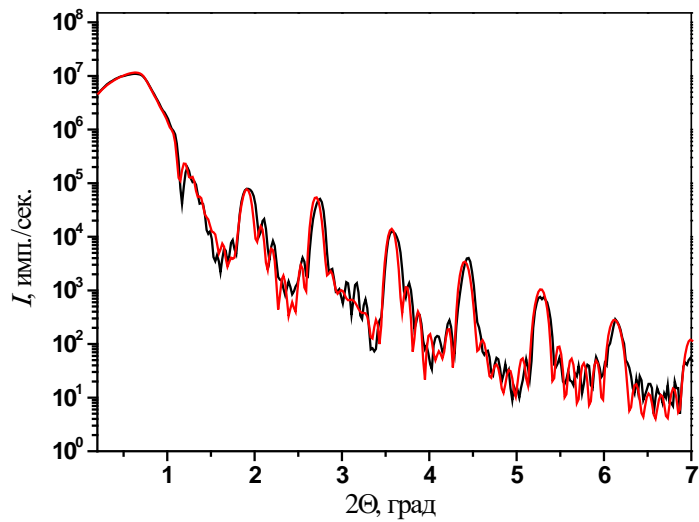


Рисунок 1.1.14.11- Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца №11(черная линия) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия).

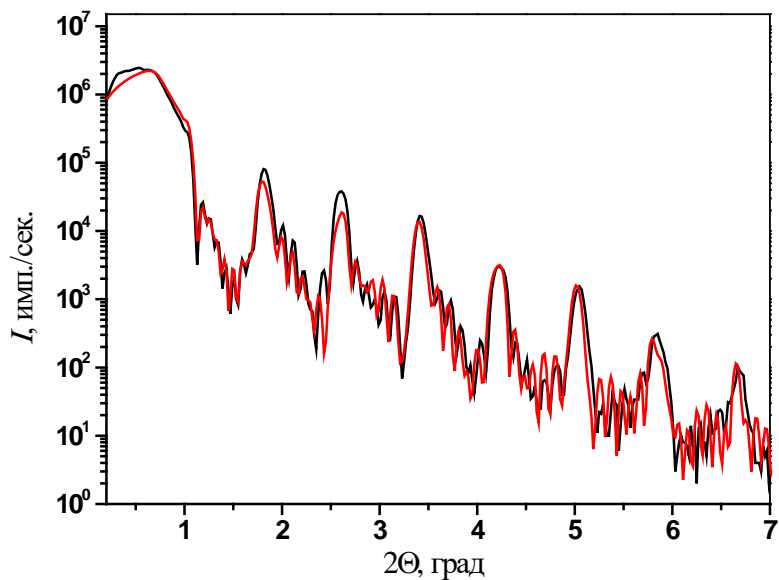


Рисунок 1.1.14.12 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца №12(черная линия) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия).

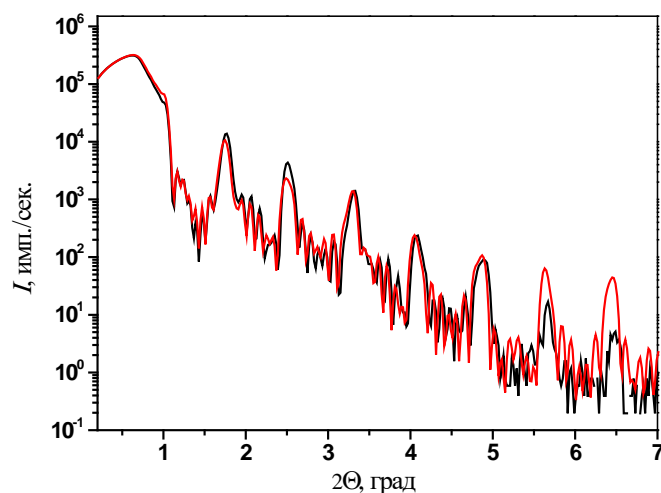


Рисунок 1.1.14.13 - Экспериментальная рентгеновская рефлектограмма образца №13 (черная линия) измеренная при излучении Cu и модельная кривая (красная линия).

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

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

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

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

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

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

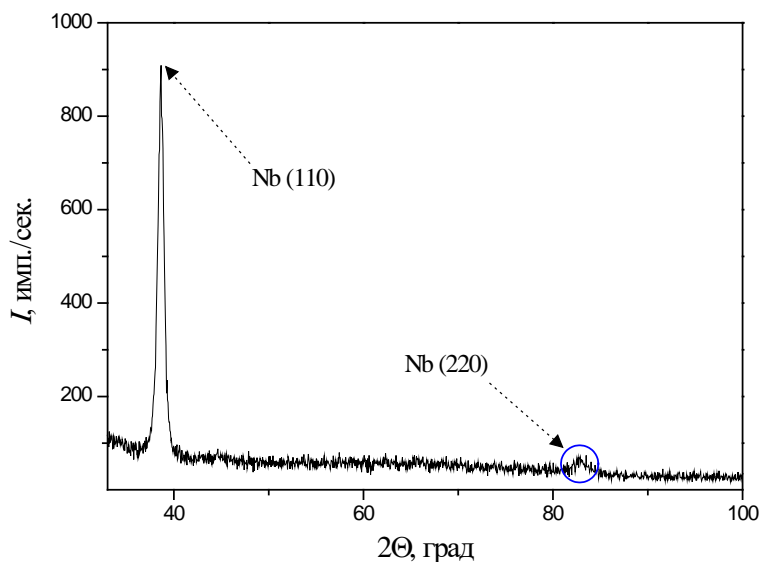


Рисунок 1.1.14.14 - Дифрактограмма от образца №1, измеренная вдоль направления роста образца.

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

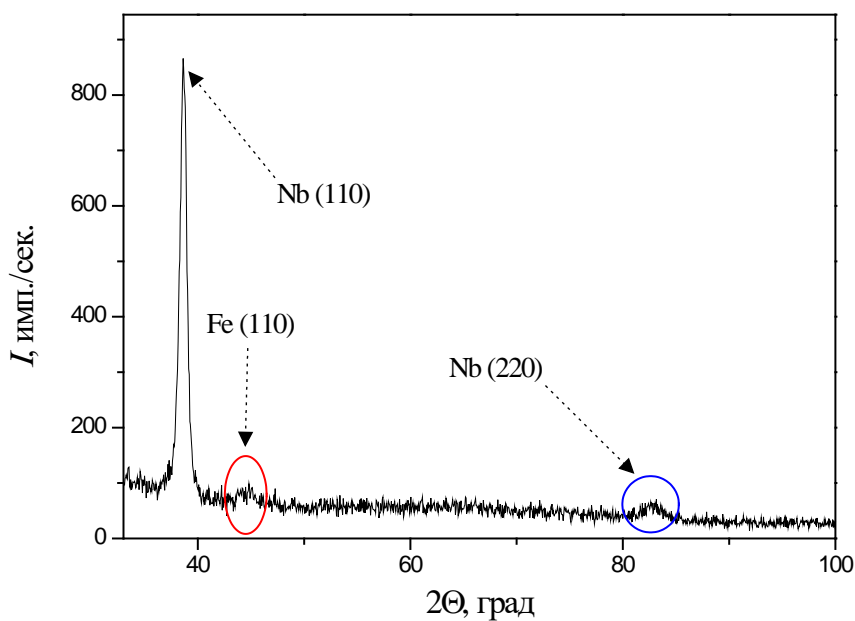
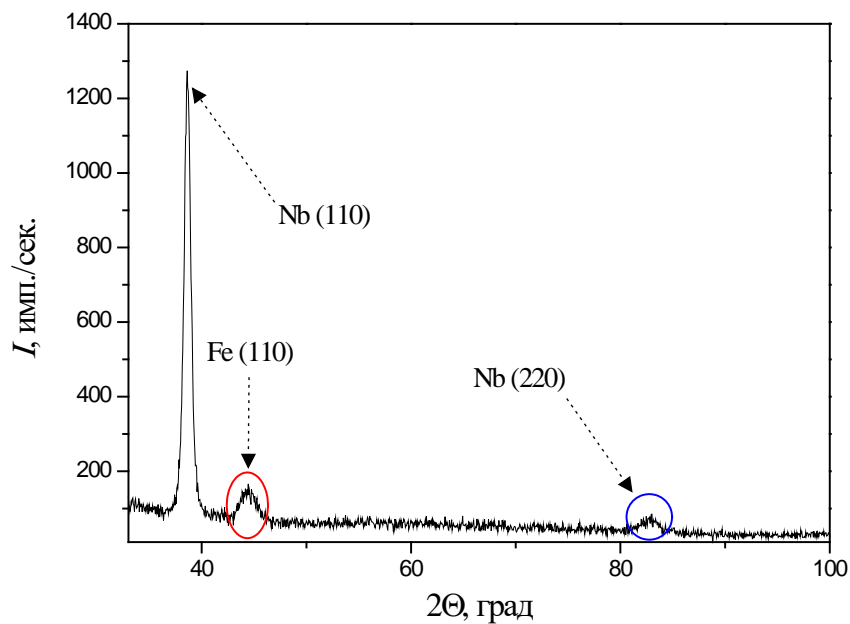


Рисунок 1.1.14.15 - Дифрактограммы от образцов №9 (сверху) и №11(снизу), измеренные вдоль направления роста образцов.

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

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

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

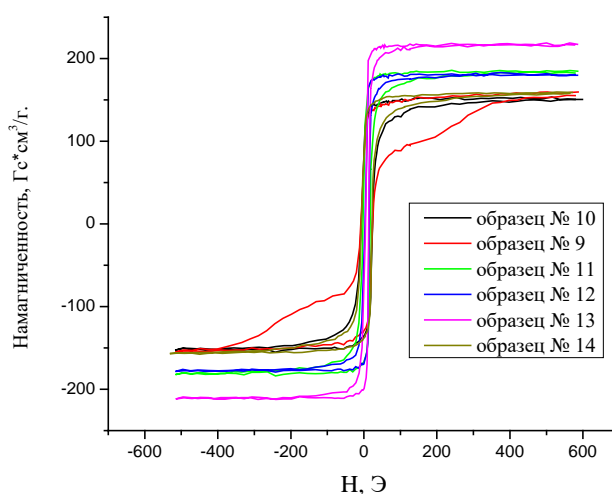


Рисунок 1.1.14.16 -Петли гистерезиса для образцов № 9 – 14

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

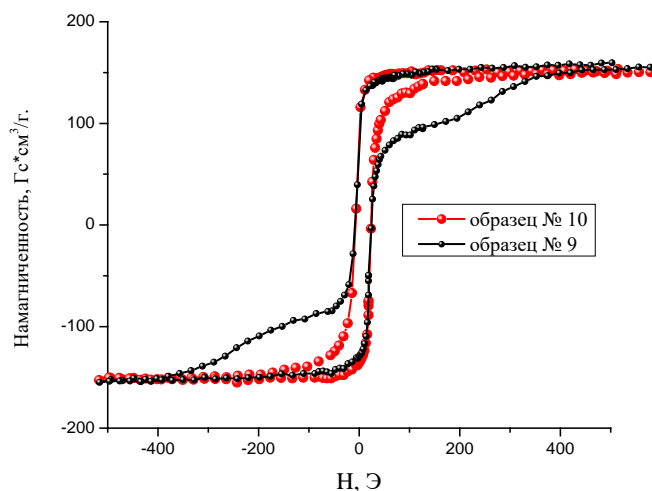


Рисунок 1.1.14.17 - Петли гистерезиса для образцов №9 и №10

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

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

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

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

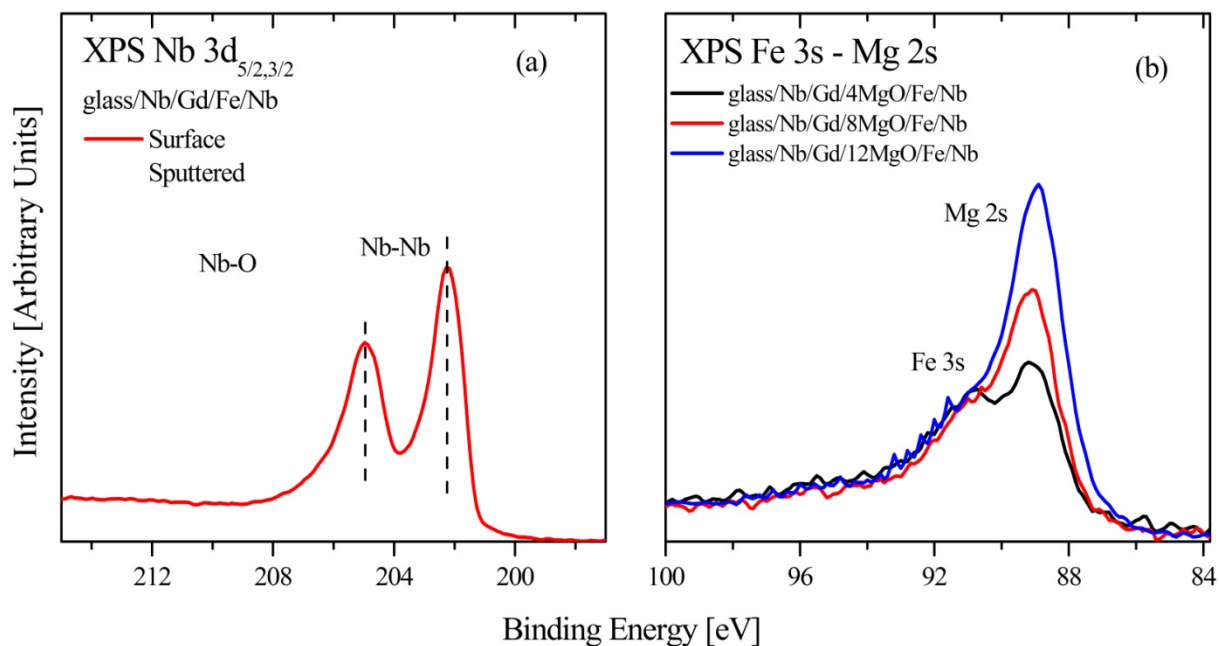


Рисунок 1.1.14.18 - XPS Nb 3d (а) стекло/Nb/Gd/Fe/Nb с поверхности и после ионного травления и (б) XPS Fe 3s-Mg 2s-спектры стекло/Nb/Gd/MgO/Nb для $n = 0.4, 0.8$ и 1.2 нм.

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

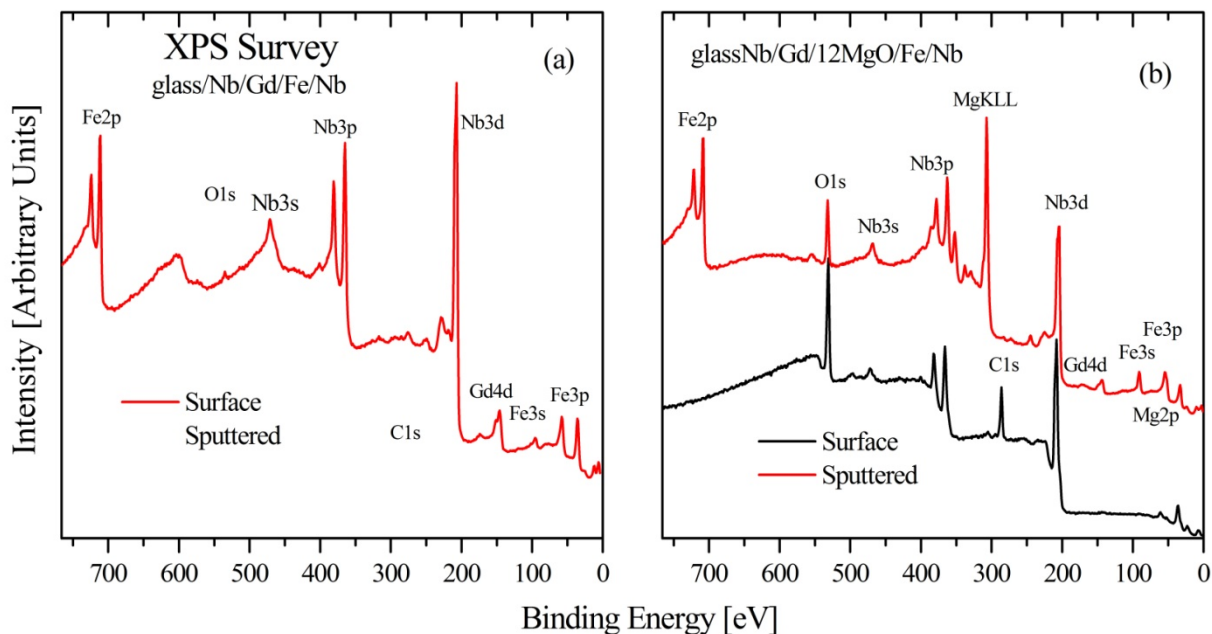


Рисунок 1.1.14.19 - Обзорные XPS-спектры glass//Nb/Gd/Fe/Nb (а) и glass//Nb/Gd/MgO1.2/Fe/Nb (б).

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

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

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

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

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

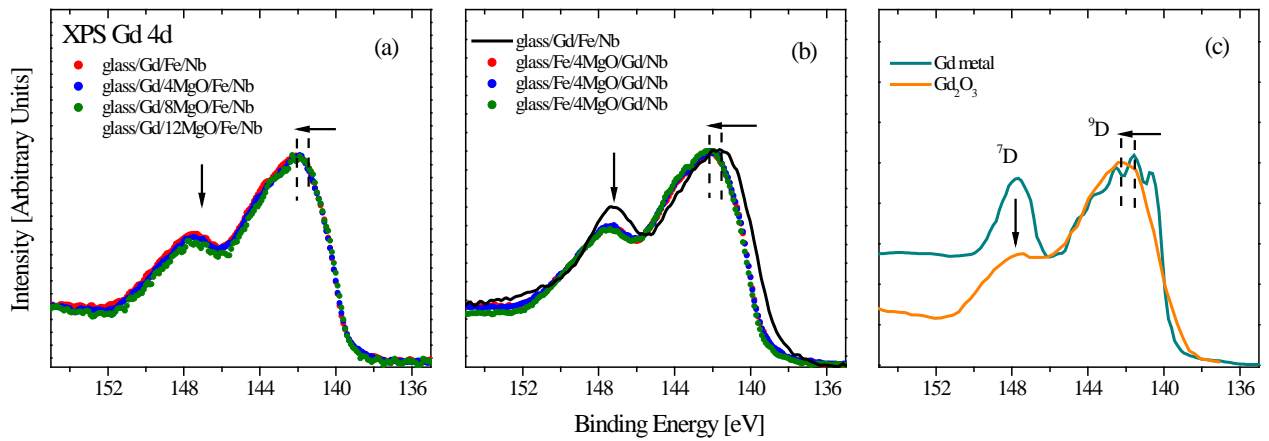


Рис. 1.1.14.20 XPS Gd 4d glass//Nb/Gd/Fe/Nb, glass//Nb/Gd/MgOn/Fe/Nb и glass//Nb/Fe/MgOn/Nb ($n = 0.4, 0.8$ и 1.2 нм) по сравнению со спектрами эталонных образцов (Gd [1.1.14.5], Gd₂O₃ [1.1.14.6]).

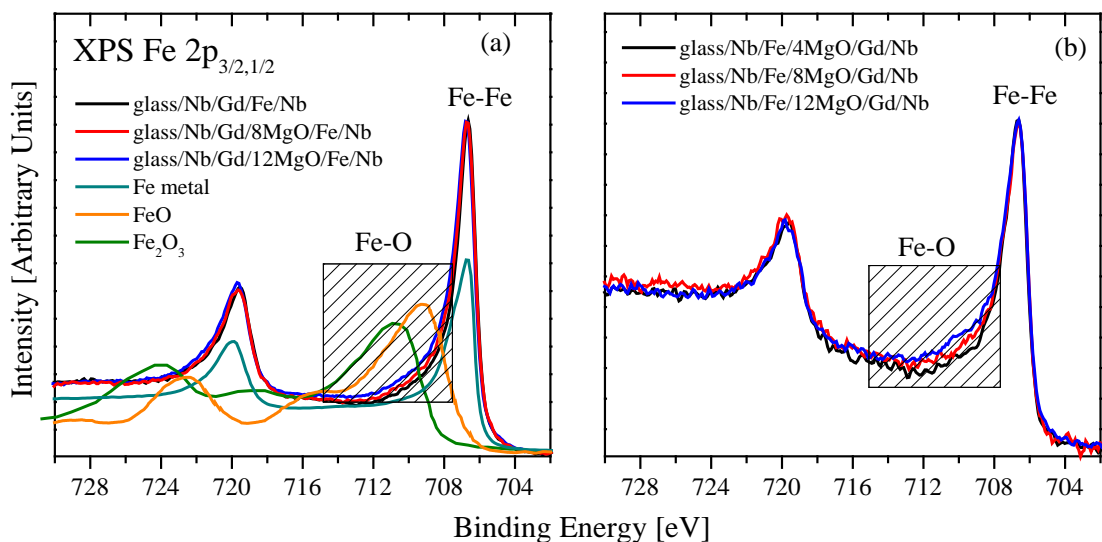


Рисунок 1.1.14.21 - Fe 2p-спектры XPS glass//Nb/Gd/Fe/Nb, glass//Nb/Gd/ MgOn/Fe/Nb и glass//Nb/Fe/MgOn/Nb ($n = 0.4, 0.8$ и 1.2 нм) и спектры эталонных образцов (Fe [1.1.14.5], FeO, Fe₂O₃ [1.1.14.7]).

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

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

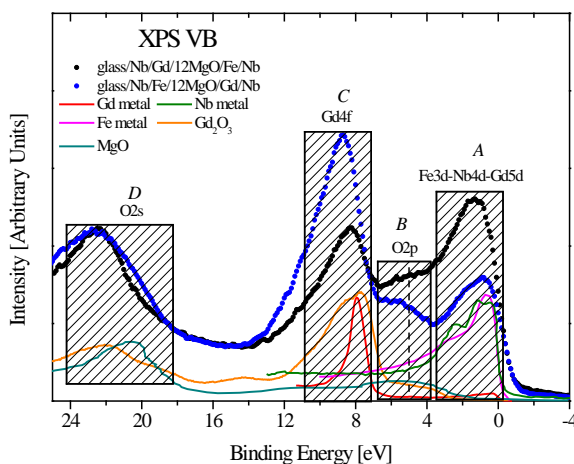


Рисунок 1.1.14.22 - Сравнение спектров XPS VB glass//Nb/Gd/Fe/Nb, glass//Nb/Gd/MgO 1,2нм/Fe/Nb и glass//Nb/Fe/MgO 1,2нм/Nb со спектрами эталонных образцов (Gd [1.1.14.5], Nb [1.1.14.8], Fe [1.1.14.9], Gd₂O₃ [1.1.14.6] и MgO).

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

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

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

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

Приложения

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

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

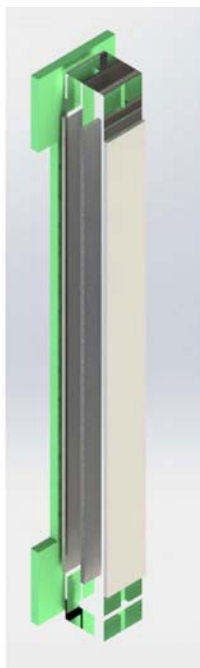


Рис. 1.1.15.2 – Общий вид детектора.

Конструкция данного типа сцинтилляционного детектора обладает следующими преимуществами:

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

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

- простота изготовления детекторов различных форм и размеров.

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

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

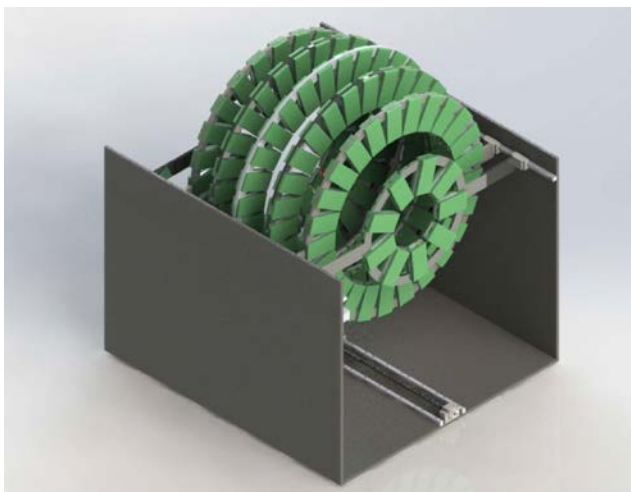


Рис. 1.1.15.3 общий вид детектора сфера

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

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

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

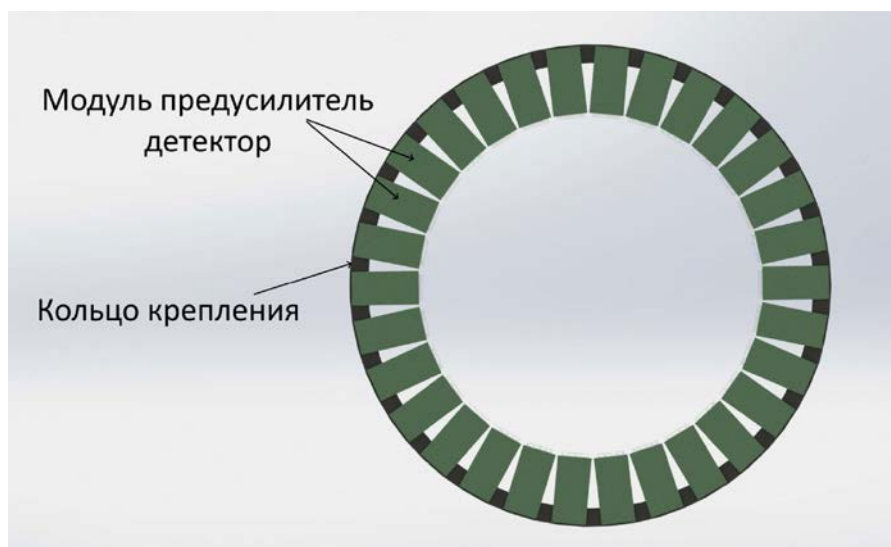


Рис. 1.1.15.4 общий вид кольца детектора

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

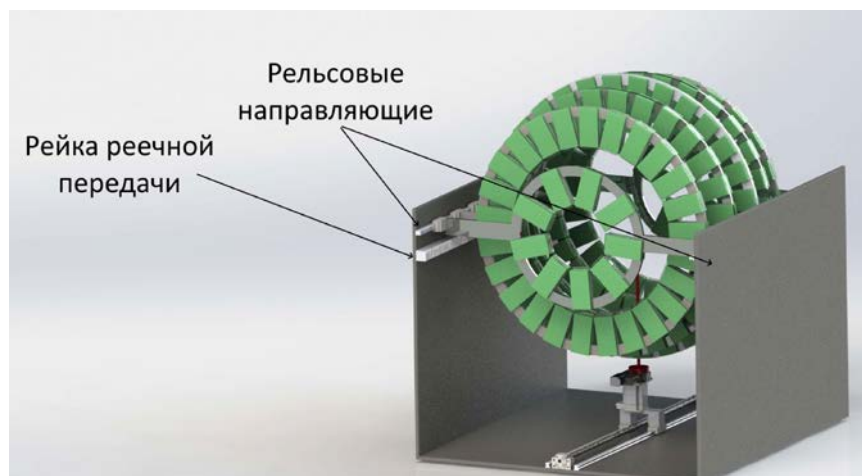


Рис. 1.1.15.5 Общий вид детектора и системы перемещения

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

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

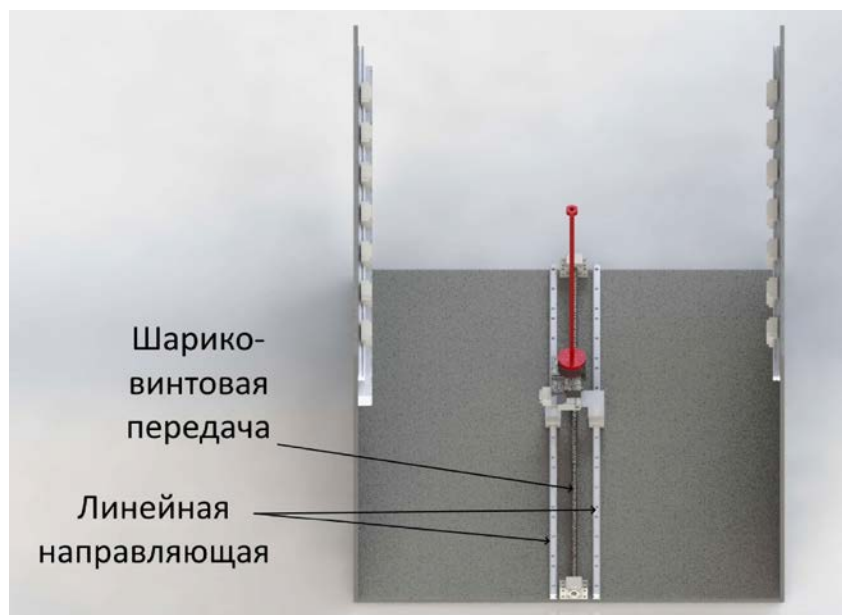


Рис. 1.1.15.6. Общий вид системы перемещения стола образца

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

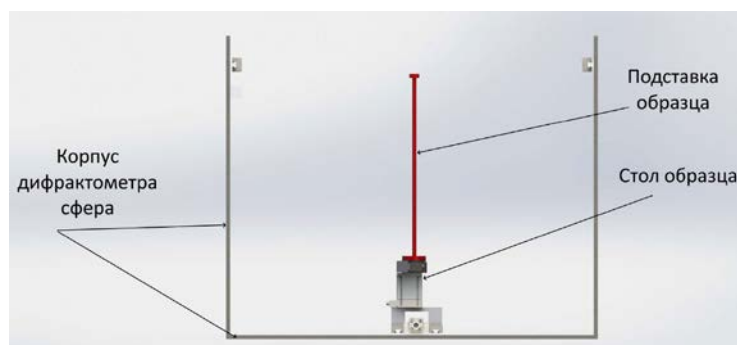


Рис. 1.1.15.7 Общий вид корпуса дифрактометра сфера

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

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

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

Приложения

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

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

Цель работы — это увеличения эффективности регистрации нейтронов нейтронными детекторами на основе сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя. Это возможно лишь 2мя способами. Первый это увеличения эффективности самого сцинтиллятора, второй – это увеличение количества слоев сцинтиллятора. Увеличение эффективности самого сцинтиллятора без увеличения толщины невозможно, а оптимальной толщиной для создания нейтронных детекторов считается 0.5мм т. к. с более толстого сцинтиллятора свет не будет выходить и будет поглощаться самим сцинтиллятором. Максимально доступная на сегодняшний момент эффективность сцинтиллятора 48% фирмы Eljen Technology.

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

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

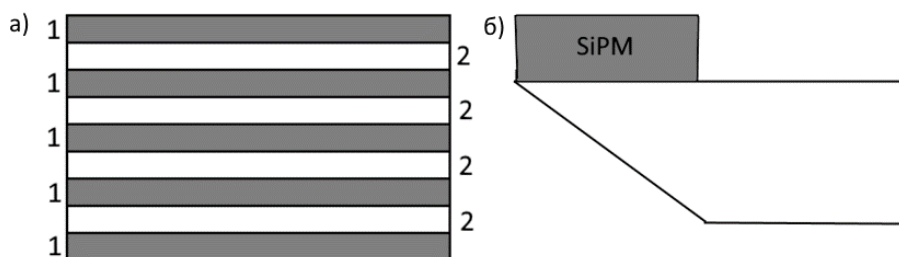


Рисунок 1.1.16.1, принцип построения детектора

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

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

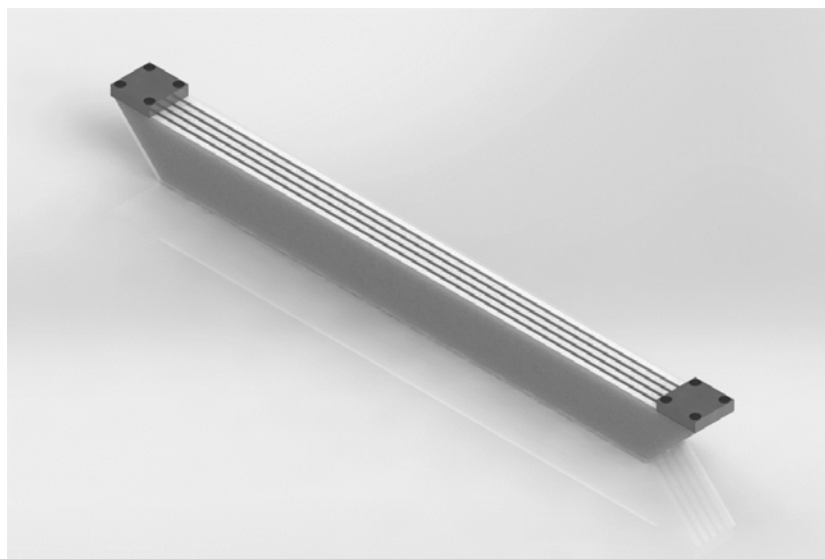


Рисунок 1.1.16.2, модель разработанного детектора.

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



Рисунок 1.1.16.3. Внешний вид

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

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

Приложения.

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

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

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

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

Данный ОЭУ должен выполнять следующие задачи:

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

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

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

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

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

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

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

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

Приложения.

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

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

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

(совместно с К(П)ФУ).

Введение

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

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

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

Применение современных технологий в промышленности, народном хозяйстве, сфере

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

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

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

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

Структура программ дополнительного профессионального образования [1.3.1.1]:

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

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

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

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

изменениями на 27 марта 2018 г.).

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

Общая характеристика разработанных программ

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

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

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

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

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

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

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

Слушатель должен знать:

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

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

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

Слушатель должен уметь:

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

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

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

Содержание программ

Учебный план

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

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

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

Опыт реализации программ дополнительного образования по получению и совершенствованию компетенций в области работы с современным экспериментальным оборудованием показывает, что для полноценного освоения программы и закрепления полученных навыков требуется не менее 72 ч. Ввиду того, что обучение происходит с отрывом от производства, именно такой, – минимальный, объем учебной работы был заложен в программу. Четверть от этого объема отдается на самостоятельную работу слушателя (СРС), остальная часть

составляет работу на занятиях, и несколько часов отводится на итоговую аттестацию (табл. 2). Для получения представления о работе синхротронных и нейтронных источников излучения, понимания основ функционирования их основных узлов, большая часть аудиторных часов отводится на лабораторные занятия.

Таблица 1.3.1.1 – Наполнение учебных планов разработанных программ ПК «Проведение синхротронных и нейтронных исследований»

Блок учебного плана	Профиль базового образования обучающихся		
	естественнонаучный	биомедицинский	археологический
Синхротронное излучение	1. Введение. Что такое синхротронное излучение. 2. Вакуумная и низкотемпературная техника в синхротронных и нейтронных установках. 3. Сверхпроводящие магнитные системы. 4. Введение в физику твердого тела. Фундаментальные основы рентгеноструктурного анализа. 5. Основы взаимодействия излучения с веществом. 6. Методы диагностики материалов различных масштабов с использованием синхротронного излучения		
Радиационная безопасность	7. Радиационная безопасность при работе с источниками ионизирующего излучения		
Нейтронное излучение	8. Нейтроны, свойства. Источники нейтронов. Взаимодействие нейтронов с веществом.		
Прикладные исследования	9. EXAFS и XANES спектроскопия. Физические основы и применение. 10. Нейтронные пучки. Нейтронная дифрактометрия и спектроскопия.	9. Применение синхротронного и нейтронного излучения в практической медицине. 10. Применение синхротронного и нейтронного излучения в области биологически наук.	9. Применение синхротронного излучения для археологических исследований. 10. Нейтронные методы в археологии.

Таблица 1.3.1.2 – Трудоемкость учебного плана в разрезе видов занятости обучающегося, ч

Вид работы	Труд оем-	Аудиторные занятия		СРС
		Всего	в том числе	

			лекции	лабораторные	практические	
Учебные часы	68	50	22	28	0	18
Итоговая аттестация	4	4	0	0	4	0
ИТОГО	72	54	22	28	4	18

Календарный учебный график

При формировании графика учебного процесса осуществлено равномерное распределение учебных занятий с понедельника по субботу в соответствии с учетом рационального использования рабочего времени обучающихся и преподавателей, объема и уровня трудности нового материала, чередования и последовательности лекционных и лабораторных занятий, выделения времени на подготовку отчетов по лабораторным работам (табл. 3). Конкретные даты проведения занятий определяются и утверждаются при наборе группы на обучение.

Таблица 1.3.2.3 – График учебного процесса при реализации программ ДПО

Период обучения	Наименование раздела
1 день	Тема 1
2 день	Тема 2
3 день	Тема 3
4 день	Тема 4
5 день	Тема 4
6 день	Тема 5
7 день	Тема 6
8 день	Тема 7
9 день	Тема 8
10 день	Тема 9
11 день	Тема 9
12 день	Тема 10
13 день	Итоговая аттестация

Тематическое наполнение разделов программ осуществлено с учетом потребности обучаемого контингента в тех или иных знаниях и формировании заданных компетенций.

Даются обязательные понятия радиационной безопасности, мер по ее соблюдению, оценке дозовых характеристик, способов и видов защиты от ионизирующего излучения.

Рассматриваются особенности синхротронного и нейтронного излучения, их источники, способы управления пучками, взаимодействие излучения с веществом, способы описания возникающих эффектов, возможности использования в разных сферах деятельности – научных исследованиях и практических применениях.

Организационно-педагогические условия

Задействованные в образовательном процессе помещения для проведения лекционных занятий представляют собой типовые учебные аудитории, оснащенные оборудованием, позволяющим проводить показ презентаций, трансляцию видеоматериала, подключаться к Интернет-ресурсам.

Занятия лабораторного практикума проходят в лабораторных помещениях, оснащенность и условия работы, в которых соответствуют требованиям техники безопасности.

При необходимости обучающемуся предоставляются помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду КФУ.

На время освоения программы ПК обучающемуся предоставляется: конспекты лекций, руководства к выполнению лабораторных работ, доступ к электронным библиотечным ресурсам через сеть КФУ и доступ к библиотечным фондам КФУ. Список источников информации, обеспечивающих образовательную программу, составлен с учетом доступности – либо в библиотечном фонде КФУ, либо через электронно-библиотечную систему сети КФУ. Полный список рекомендованных источников представлен в программах ПК (Приложение А), учебном пособии, руководствах по выполнению лабораторных работ.

Реализация программ ПК обеспечивается научно-педагогическими работниками КФУ, а также лицами, привлекаемыми КФУ на других условиях, ведущими научную, учебно-методическую и (или) практическую работу, соответствующую профилю преподаваемого раздела. Не менее 80 % численности научно-педагогических работников, участвующих в реализации программы ПК, имеют ученую степень (в том числе ученую степень, полученную в иностранном государстве и признаваемую в Российской Федерации) и (или) ученое звание (в том числе ученое звание, полученное в иностранном государстве и признаваемое в Российской Федерации). Кадровый состав, участвующий в реализации программ ПК, представлен авторским коллективом и может отличаться в зависимости от года реализации программ.

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

Обеспечение теоретического блока

Одно из основных назначений программы дополнительного образования (повышения квалификации) – знакомство слушателей с последними достижениями в рассматриваемой сфере деятельности и соответственно – новыми возможностями, появившимися благодаря этим достижениям. Вторая особенность краткосрочных программ обучения – концентрация информации, которую нельзя получить из одного источника. Поэтому для обеспечения планомерного течения учебного процесса и сокращения времени слушателя на поиски нужной информации, подготовлено учебное пособие, являющееся кратким конспектом лекций и содержащее ссылки на специфические для каждой темы источники информации: Батулин Р. Г., Болтакова Н. В., Дулов Е. Н. и др. Проведение синхротронных и нейтронных исследований: Учебное пособие. – Казань: Казан. ун-т, 2021. – 176 с. (https://drive.google.com/drive/folders/10Hnm6FTeQI5Sq3rXFQU3cohok9gEpE_j).

Подготовлен кейс мультимедийного (аудиовизуального) сопровождения образовательных программ ПК (ссылка для просмотра: <https://drive.google.com/drive/folders/1ovwyyeGGu7maVDBEyew7r0hg6MiAbRdn>). Информация по названию и типу видеоматериалов приведена в таблице 1.3.1.4, где профиль целевой аудитории обозначена как: ЕН – естественнонаучный, БМ – биомедицинский, АИ – археологический.

Назначение мультимедийного кейса – обеспечение эффективности самостоятельной работы по:

- усвоению материала лекций;
- теоретической подготовки, необходимой для качественного выполнения лабораторных работ;
- подготовке к тестированию;
- расширению кругозора и более глубокое понимание прикладного потенциала изучаемых методов.

Деление материалов на профили условно. Каждый слушатель в целях саморазвития может ознакомиться со всеми материалами мультимедийного кейса.

Подготовка мультимедийного кейса проводилась силами творческого коллектива редакции телевизионных и радиопрограмм Медиа-Центра КФУ «Univer» и учебно-практической лаборатории «UNIVER TV» Института социально-философских наук и массовых коммуникаций. Все работы

выполнены с использованием специализированного оборудования и съемочных площадок структурных подразделений КФУ.

Таблица 1.3.1.4 – Состав подготовленного кейса мультимедийного сопровождения

Название	Лектор	Программа ПК		
		ЕН	БМ	АИ
1. Образовательные лекции				
Изучение историко-культурного наследия	декан высшей школы исторических наук и всемирного культурного наследия, д-р ист. наук, проф. Ситдииков А. Г.			+
Взаимодействие нейтронов с веществом»	доцент кафедры физики твердого тела (ФТТ), канд. физ.-мат. наук Дулов Е. Н.	+	+	+
Белковая кристаллография	проф. кафедры медицинской физики, д-р физ.-мат. наук Усачев К. С.	+	+	+
2. Научно-популярные интервью				
Назначение физических методов исследования в материаловедении	директор Института физики (ИФ) КФУ, д-р физ.-мат. наук, Гафуров М. Р.,	+	+	+
Казанская школа ядерного гамма-резонанса	доцент кафедры ФТТ ИФ, канд. физ.-мат. наук Вагизов Ф. Г.,	+		
Казанская школа магнитного резонанса	зав. кафедрой квантовой электроники и радиоспектроскопии ИФ, д-р. физ.-мат. наук Тагиров М. С.	+		
Рентгеноструктурный анализ от минералов до белков	канд. хим. наук, с. н. с. научно-исслед. лаб. «Структурная биология», Исламов Д. Р.	+	+	+
Неразрушающие методы исследования структуры и состава объекта в археологии	декан высшей школы исторических наук и всемирного культурного наследия Института международных отношений КФУ, д-р ист. наук, проф. Ситдииков А. Г.			+
Рентгенографический анализ геологических пород	зав. кафедрой квантовой минералогии и литологии, д-р. геолого-минер. Наук Морозов В. П.	+		+
Белковая кристаллография	проф. кафедры медицинской физики ИФ, д-р физ.-мат. наук Усачев К. С.	+	+	

История развития физики ядра и элементарных частиц	доцент кафедры ФТТ ИФ, канд. физ.-мат. наук Дулов Е. Н.	+	+	+
Использование ядерной энергии в мирных целях	Зам. директора ИФ по образовательной деятельности, доцент кафедры ядерно-физического материаловедения, канд. физ.-мат. наук Болтакова Н. В.	+	+	+

Для предварительного ознакомления с условиями обучения подготовлены видеозаписи по учебным помещениям, задействованным в программах ПК:

- онлайн-лекция из Объединенного института ядерных исследований «Введение в теорию ускорителей» в ауд. 305 ИФ;
- ядерный практикум в лаборатории ядерной физики кафедры ФТТ ИФ КФУ;
- лаборатория научной реставрации Института международных отношений КФУ;
- лаборатория структурной биологии Института фундаментальной медицины и биологии КФУ.

В соответствии с общими тенденциями развития цифрового общества, новых рекомендаций министерства образования РФ, все современные обучающие программы должны соответствовать не только высоким научным и практическим запросам, но и иметь высокую наглядность, демонстрационную составляющую. При организации образовательного процесса следует особое внимание уделять возможностям использования онлайн-формам обучения, реализации образовательных программ в смешанных и дистанционных форматах. В связи с этим подготовленный мультимедийный кейс может служить базой для разработки программ ПК с дистанционным форматом обучения.

Обеспечение лабораторного практикума

В состав лабораторного практикума, обеспечивающего поддержку разработанных программ ПК, входит 10 лабораторных работ различных лабораторных практикумов, функционирующих в рамках обеспечения текущего образовательного процесса. Каждая работа сопровождается руководством к выполнению с приведением краткой теории, описанием установки, алгоритма выполнения работы и обработки полученных данных:

- 1) Исследование линейно-поляризованного света и проверка закона Малюса (https://kpfu.ru/portal/docs/F1884910413/Issledovanie.linejno._polyarizovannogo.sveta.i.proverka.zakona.Maljusa.pdf);
- 2) Получение тройной точки азота (https://kpfu.ru/portal/docs/F_393521741/236.pdf);
- 3) Исследование эффекта Джоуля-Томсона для различных газов (<https://kpfu.ru/portal/docs/F370214929/217.pdf>);

4. Высокотемпературная сверхпроводимость (https://kpfu.ru/docs/F1030230154/LR._531..VTSP.pdf);
5. Определение удельного заряда электрона (https://kpfu.ru/portal/docs/F_885395505/337.pdf);
6. Отражение Брэгга: определение постоянной решетки монокристалла (Cu, Mo анод) (https://kpfu.ru/docs/F1249128539/_541. Otrazhenie. Bregga. opredelenie. postoyannoj. reshetki. monokristallov.pdf);
7. Определение постоянной решетки кубической сингонии методом Дебая-Шерера (https://kpfu.ru/docs/F2143828790/_542..Opredelenie.postoyannoj.reshetki.kubicheskoi.singonii.metodm.Debaya_Sherera._poroshka_.pdf);
8. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом. Рентгеноструктурный анализ (https://kpfu.ru/portal/docs/F_1286696692/metod.posobie.Specpraktikum.pdf);
9. Закон Мозли и определение постоянной Ридберга (https://kpfu.ru/docs/F1428207156/_572...Zakon.Mozli.i.opredelenie.postoyannoj.Ridberga.pdf);
10. Нейтронно-активационный анализ (<https://kpfu.ru/docs/F1050080452/nejtronnaya.aktivaciya.pdf>).

Современные технологии предоставляют широкий спектр инструментов для цифровизации процесса обучения. Особый интерес представляет цифровизация и автоматизация трудоёмких процессов и сложных в воспроизведении структур.

Одним из трудоёмких процессов может выступать проведение экспериментов с участием радиоактивных элементов. Необходимость содержать специальную лабораторию и сложное оборудование при учебном заведении может стать препятствием к качественному образованию студентов и получению полноценного академического опыта.

Создание виртуальных лабораторий может стать решением этой проблемы. Эксперименты в виртуальной лаборатории можно повторить необходимое количество раз без химических элементов, оборудования и даже без участия преподавателя.

Дополнительным преимуществом цифровой визуализации экспериментов выступает возможность отразить процессы более подробно. Некоторое оборудование невозможно рассмотреть изнутри в реальности, в то время как виртуальное оборудование не ограничивает студентов в исследованиях.

Лаборатория Digital Media Lab, в которой проводилась разработка приложения, занимается преимущественно разработкой различных видеоигр с использованием движков Unity и Unreal Engine. Лаборатория визуализации и разработки игр является лабораторией Института информационных технологий и интеллектуальных систем КФУ. Основные сферы деятельности:

- разработка компьютерных, мобильных и Web-игр;

- визуальная симуляция производственных процессов;
- проекты с использованием технологий Oculus Rift, Kinect, NettleBox.

Задача, поставленная перед лабораторией в рамках данного проекта – создание приложения для визуализации экспериментов в рамках курса о синхротронных и нейтронных исследованиях. Название приложения – Virtual Laboratory. Приложение выполнено в стилистике реализм. Пользователь может просмотреть один из представленных экспериментов. В настоящее время выполнено два сценария для демонстрации (<http://youtube.com/channel/UCJqS5Ub-XvWUTXaoELg8pPw>):

- определение периода полураспада нуклидов;
- рентгеноструктурный анализ белка.

Во время демонстрации пользователя сопровождают комментарии закадрового голоса о происходящем на сцене. Во время воспроизведения эксперимента пользователь может остановить движение сценария и перейти в режим свободного перемещения по сцене.

Для разработки приложения использовался движок Unity. Команда состояла из нескольких разработчиков, моделлеров и проектного менеджера. Некоторые разработчики выполняли роль тестировщиков.

Перечень работ, необходимых для разработки ключевого функционала приложения:

- создание 3D-моделей окружения (комната лаборатории, стол, источники освещения);
- создание 3D-моделей для экспериментов (дифрактометр, источник нейтронов, линейка, пипетки, белок, шприц и т. д.);
- текстурирование 3D-моделей;
- запекание света и настройка постпроцессинга на сцене;
- создание главного меню и пользовательского интерфейса;
- внедрение возможности выбора эксперимента для просмотра;
- разработка системы с двумя режимами воспроизведения эксперимента;
- реализация сценариев экспериментов;
- запись и внедрение звуковых файлов;
- тестирование и подготовка установочного файла приложения.

При разработке сценария были использованы фотографии и видеозаписи работы реального оборудования, были сняты настоящие показатели датчиков и получены комментарии от практикующих преподавателей КФУ. С помощью методических пособий были разработаны два сценария с перечнем необходимых моделей, а также описанием визуального и звукового рядов. Далее представлено краткое описание и табличное представление каждого сценария.

Для создания моделей использовался Blender 3D. Blender – это профессиональное, свободное и открытое программное обеспечение для создания трёхмерной компьютерной графики,

включающее в себя средства моделирования, скульптинга, анимации, симуляции, рендеринга, постобработки и монтажа видео со звуком, компоновки с помощью «узлов» (Node Compositing), а также создания 2D-анимаций. В настоящее время пользуется большой популярностью среди бесплатных 3D-редакторов в связи с его быстрым стабильным развитием и технической поддержкой. В процессе обсуждения был выбран стиль реализм, то есть модели имеют достаточное количество полигонов, используются PBR-материалы.

Для создания реалистичного освещения, а также оптимизации потребления ресурсов компьютера было решено использовать смешанный тип освещения. Для этого на сцену было добавлено пять источников света для статичных объектов, а также один источник для создания теней в реальном времени. Источники света расположены в местах потолочных светильников лабораторной комнаты. После этого статичные объекты на сцене были помечены свойством `static`, чтобы запечь статичный свет на эти объекты.

После этого свет запекался на статичные объекты и в результате создавались карты освещения. Карта освещения — метод освещения пространства в 3D-приложениях, заключающийся в том, что создается текстура (рис. 1.3.1.1), содержащая информацию об освещенности трехмерных моделей. Также было подобрано разрешение карт освещения для обеспечения оптимального качества. В итоге были получены наборы запеченных карт освещения для двух сцен.

В приложение был добавлен постпроцессинг, для повышения реалистичности и качества картинки, которую пользователь видит на экране. Был создан и настроен специальный профиль постпроцессинга, который улучшил цвета, контрастность, свечение, поверхностное затенение, экспозицию, насыщенность (рис. 1.3.1.1).

Разработано образовательное приложение для компьютеров, управляемых операционной системой Windows. Программный продукт позволяет демонстрировать обучающие визуализации реальных экспериментов.



Рисунок 1.3.1.1. – Сцена без (а) и с (б) постпроцессингом

Фонд оценочных средств

Оценка итоговой аттестации (максимум 100 баллов) складывается из оценки, полученной в результате текущего контроля знаний (максимум 40 баллов) и промежуточного тестирования (максимум 60 баллов).

Такая система оценки знаний разработана с учетом того, чтобы она отвечала оценке сформированности целевых компетенций.

Текущий контроль успеваемости осуществляется в виде приема отчета по выполненным лабораторным работам. Требования к содержанию и оформлению отчета приводятся в руководствах по выполнению лабораторных работ, а также сформулированы в отдельных приложениях к программам ПК – входят в состав фонда оценочных средств (Приложение Б).

Промежуточная аттестация – экзамен в форме тестирования по всем разделам программы ДПО. Для объективной оценки знаний и охвата всех тем программы, сформирован банк тестовых заданий: всего 140 заданий с тремя вариантами ответов, один из которых правильный. Полный набор заданий приведен в составе фонда оценочных средств (Приложение Б).

Программа считается освоенной при наборе слушателем не менее 50 баллов по результатам итоговой аттестации. В случае набора менее 50 баллов слушателю предоставляется возможность повторно пройти итоговое тестирование для набора достаточного количества баллов для успешной аттестации. Всего на прохождение тестирования предоставляется три попытки в течение пяти дней, следующих за последним днем обучения.

В случае неудовлетворительных результатов итоговой аттестации слушатель может пройти повторную аттестацию только при повторном обучении по данной программе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена работа по анализу информации о современном состоянии дел в области синхротронных и нейтронных источников излучений. Произведена систематизация методов исследования по типу излучения, по сфере применения, по типу исследуемых объектов. Широкий охват сфер применения говорит о большом потенциале синхротронных и нейтронных методов, о необходимости внедрения образовательных программ на уровне повышения квалификации различных профессиональных категорий.

По итогам проведенной работы получены следующие результаты.

1. Подготовлено три программы (Приложение А), ориентированных на разные профессиональные группы:

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

2. Разработаны:

1) учебные планы образовательных программ (в составе программ, Приложение А);

2) оценочные материалы (в составе фондов оценочных средств, Приложение Б);

3) методические материалы:

- учебное пособие;
- научно-популярные интервью (9 эпизодов);
- образовательные лекции (3 лекции);
- ознакомительные видеоэкскурсии (4 эпизода);
- две виртуальные лаборатории.

Результаты могут быть положены в основу дальнейшей разработки рабочих программ дисциплин высшего образования.

Выполненные работы и полученные в ходе их выполнения результаты полностью соответствуют Техническому заданию и Плану-графику работ, выполняемых в рамках реализации исследовательской программы (проекта) (Приложения №№ 1, 2 к Договору от 30» ноября 2021 г. № 400/2008).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[1.3.1.1] Положение о дополнительном образовании в ФГАОУ ВО «К(П)ФУ» / Утв. рект. И. Р. Гафуровым 19.02.2014 г. № 0.1.1.67-06/24/14. – Режим доступа: https://kpfu.ru/docs/F106434081/pol_do_190214.pdf (дата обращения 10.11.2021).

[1.3.1.2] Федеральный закон Российской Федерации «Об образовании в Российской Федерации» от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ (в действующей редакции от 1.09.2021 г.).

[1.3.1.3] Приказ Министерства образования Российской Федерации «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по дополнительным общеобразовательным программам» (с изменениями на 30 сентября 2020 года).

Приложение.

1. Учебный план образовательной программы, оценочные материалы, методические материалы.
Файл Прилож.1.3.1.pdf

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

(совместно с К(П)ФУ. Совместно с К(П)ФУ. Договор 400/2008 от 03.12.2021).

Содержательная часть совпадает с п. 1.3.1.

Приложение.

1. Учебный план образовательной программы, оценочные материалы, методические материалы.

Файл Прилож.1.3.2.pdf

1.3.3 Создание научно-образовательной лаборатории для проведения научно-исследовательские работы студентов и аспирантов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также элементов и систем экспериментальных станций. (Совместно с МФТИ. Договор 400/1984 от 23.11.2021).

В Московском физико-техническом институте совместно с Объединенным институтом ядерных исследований создана научно-образовательная лаборатория перспективных технологий для установок и экспериментов мегасайенс (Лаборатория перспективных технологий мегасайенс, приказ 74-6 от 07.12.2021). В задачи лаборатории будет входит:

- проведение фундаментальных и прикладных научных исследований мирового уровня в области физики, техники и технологий для установок и экспериментов мегасайенс, а также в смежных областях;
- интеграция лаборатории в национальные и международные коллаборации с целью усиления экспертизы в области деятельности лаборатории;
- концентрация на базе лаборатории ведущих ученых и их участие в образовательном процессе МФТИ, включая руководство научно-исследовательской работой студентов, аспирантов, молодых исследователей.

В соответствии с возложенными на нее задачами лаборатория перспективных технологий мегасайенс осуществляет следующие функции:

- выполняет научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, в том числе по заказу предприятий и организаций всех форм собственности, международных организаций;
- привлекает преподавателей и научных работников МФТИ, а также внешних специалистов и экспертов к проведению научно-исследовательских работ на базе Лаборатории;
- выполняет экспертные работы, в том числе обеспечивает участие работников Лаборатории в работе соответствующих рабочих групп и комиссий с участием МФТИ, как государственных, так и неправительственных и международных, по вопросам деятельности Лаборатории;
- участвует в подготовке и проведении научных конференций, семинаров в МФТИ, а также поддерживает и расширяет профильные научные связи, в том числе международные;
- осуществляет подготовку к публикации научных материалов: монографий, статей, отчетов, выступлений, докладов и т.п. в области специализации Лаборатории;
- распространяет посредством Интернета и средств массовой информации научно-просветительскую информацию о результатах научно-исследовательских работ Лаборатории.
- организует семинары и мастер-классы по тематике Лаборатории, в том числе для работников, студентов и аспирантов МФТИ;
- привлекает студентов и аспирантов МФТИ к проведению научно-исследовательских работ на базе Лаборатории;

- содействует установлению устойчивых связей МФТИ с участниками рынка труда в области специализации Лаборатории с целью улучшения возможностей трудоустройства выпускников МФТИ.

В рамках своей деятельности лаборатория принимает участие в мероприятиях Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 – 2027 годы, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 16 марта 2020 г. № 287 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 – 2027 годы»:

а) проведение синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач, в том числе: поддержка научных и научно-технических проектов, выполняемых организациями, в том числе совместно с организациями, действующими в реальном секторе экономики, представителями международного научного сообщества, а также проектов исследователей в возрасте до 39 лет; поддержка разработки и трансфера прорывных технологий, созданных с использованием результатов синхротронных и нейтронных исследований, а также ускорительных, реакторных и ядерных технологий, в том числе в рамках развития ядерной медицины;

б) создание сетевой синхротронной и нейтронной научно-исследовательской инфраструктуры на территории Российской Федерации, в том числе создание и развитие на базе организаций лабораторий и центров, включая центры коллективного пользования, инфраструктуры для хранения, обработки и анализа экспериментальных данных, обеспечивающих ускоренное развитие синхротронных и нейтронных исследований, ускорительных, реакторных и ядерных технологий, в том числе технологий ядерной медицины;

в) подготовка специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня, в том числе: разработка и реализация образовательных программ высшего образования и дополнительных профессиональных программ, направленных на создание прорывных технологических решений с применением синхротронных и нейтронных источников; организация и проведение научных конференций, школ и семинаров для исследователей и обучающихся по направлениям реализации Федеральной программы в возрасте до 39 лет.

К научно-исследовательской работе будут привлекаться обучающиеся физтех-школы физики и исследований им. Ландау МФТИ, в состав которой входит созданная лаборатория и базовая кафедра ОИЯИ «Кафедра фундаментальных и прикладных проблем физики микромира», а также обучающиеся других физтех-школ.

Приложения.

1. Приказ о создании лаборатории. Файл Прилож.1.3.3.pdf

1.3.4 Формирование перечня научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории в 2022г. (Совместно с МФТИ. Договор 400/1984 от 23.11.2021).

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

ФИО	First name, Family name	Scopus ID	Организация / позиция	Наименование темы НИР
Еник Темур Львович	Enik, Temur	7801649876	Объединенный институт ядерных исследований, начальник группы Лаборатории физики высоких энергий им. Векслера и Балдина	Тонкостеночные дрейфовые трубки в экспериментах мегасайнс
Швецов Валерий Николаевич	Shvetsov, Valery	7006599034	Объединенный институт ядерных исследований, директор Лаборатории нейтронной физики им. Франка	Перспективные направления развития детекторов нейтронов

Лычагин Егор Валерьевич	Lychagin, Egor	6602383981	Объединенный институт ядерных исследований, заместитель директора по научной работе Лаборатории нейтронной физики им. Франка	Детекторы ультрахолодных нейтроны. Технологические особенности и области применения
Несвижевский Валерий Викторович	Nesvizhevsky, Valery	6603951863	Institut Laue-Langevin, Grenoble, France,	Ультрахолодные нейтроны как инструмент для изучения фундаментальных свойств нейтронов
Дедович Дмитрий Владимирович	Dedovich, Dmitri	8105593300	Объединенный институт ядерных исследований,	Детекторы ММ. Методы детектирования и конструктивные особенности
Демичев Михаил Андреевич	Demichev, Mikhail	36491284700	Объединенный институт ядерных исследований,	Применение программного пакета ROOT для анализа данных со строу детекторов
Жемчугов Алексей Сергеевич	Zhemchugov, Alexey	56967778500	Объединенный институт ядерных исследований,	Применение пакета Geant4 для описания работы детекторов

Шматов Сергей Владимирович	Shmatov, Sergei	57195761975	Объединенный институт ядерных исследований,	Физика на установках мегасайнс
Боднарчук Виктор Иванович	Bodnarchuk Victor	6601982662	Объединенный институт ядерных исследований,	Установки на ИБР2. Инструмент прикладных нейтронных исследований.

В 2021/2022 учебном году МФТИ по итогам конкурсного отбора получил право на проведение Всероссийской олимпиады студентов «Я – профессионал». по четырем направлениям, включая направление «Физика и технологии уникальных научных установок класса «мегасайнс»» (<https://lpr.mipt.ru/megascience>).

Всероссийская олимпиада студентов «Я – профессионал» проводится для студентов бакалавриата, магистратуры, специалитета российских вузов и направлена на проверку теоретических знаний и прикладных компетенций. Главная цель проекта – поддержка талантливых студентов, которая позволит им продолжить обучение в ведущем российском вузе или начать карьеру. «Я – профессионал» – один из флагманских проектов президентской платформы «Россия – страна возможностей».

Олимпиада «Я – профессионал» по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайнс”» проводится с поддержкой ОИЯИ, ФИАН, ТРИНИТИ, НИЦ КИ – ИФВЭ, ИК СО РАН и при участии вуза-соорганизатора НГУ.

По итогам регистрации, состоявшейся в период с 27 октября по 7 декабря 2021 года, для участия в направлении «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайнс”» зарегистрировались 2806 студентов из 423 вузов, расположенных в 76 регионах России и за рубежом.

Более половины зарегистрировавшихся студентов – 1761 – студенты бакалавриата. 1045 зарегистрировавшихся участников учатся в магистратуре или специалитете.

Наибольшую заинтересованность при регистрации на направление проявили студенты МФТИ – 223 студента, НИЯУ МИФИ – 156 студентов, МГУ – 95 студентов, МГТУ им. Н.Э. Баумана – 71 студент, НИУ МЭИ – 60 студентов, НИУ ВШЭ – 58 студентов, Университет ИТМО – 56 студентов, МАИ – 52 студента, СПбГУ – 50 студентов, СПбПУ Петра Великого – 48 студентов, УрФУ – 47 студентов, НГУ – 41 студент.

Для подготовки студентов к отборочному этапу олимпиады сотрудниками МФТИ, НИЦ КИ – ИФВЭ и ТРИНИТИ были разработаны демоверсии заданий отборочного этапа по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» для категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет».

Образовательный вебинар для участников направления, на котором были представлены демонстрационные задания и их решения, провел председатель методической комиссии направления, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией фундаментальных взаимодействий ЛФИ МФТИ, ведущий научный сотрудник отдела экспериментальной физики НИЦ КИ – ИФВЭ, сотрудник коллаборации ALICE (CERN) Ю.В. Харлов. Вебинар (видео): <https://youtu.be/w9JJdYhefNk>.

Для проведения отборочного этапа по направлению олимпиады «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» сотрудниками МФТИ, в том числе с привлечением созданной научно-образовательной лаборатории перспективных технологий мегасайенс, НИЦ КИ – ИФВЭ, ТРИНИТИ, ОИЯИ, ФИАН, НГУ и ИК СО РАН были разработаны задания отборочного этапа для категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет». Задания олимпиады, составленные научными сотрудниками, дают возможность студентам познакомиться с актуальными исследовательскими проблемами и попробовать свои силы в решении не учебных, а реальных задач.

Отборочный этап состоялся 10-26 декабря 2021 года. В течение этого периода участники могли выбрать день и время для того, чтобы приступить к решению задач. На решение было отведено 8 часов. Отборочный этап был организован дистанционно с использованием онлайн-платформы Яндекс.Контест.

Участники, показавшие в 2022 году лучшие результаты, получают дипломы призеров, победителей, медалистов. Для каждой категории дипломантов предусмотрены льготы при поступлении в магистратуру и аспирантуру, возможность получить стажировку/работу в научной организации. Мероприятия позволят отобрать студентов, заинтересованных в дальнейшей научной карьере, которые продолжить образование в том числе в МФТИ в области «мегасайенс», начать работу в составе научных коллективов таких организаций как ОИЯИ, ФИАН, ТРИНИТИ, НИЦ КИ, ИК СО РАН, ИЯИ РАН и др., а также в лабораториях МФТИ, НГУ и других университетов. Мероприятия форума развивают общий кругозор студентов в области их будущих возможностей, знакомят с работой российских установок класса «мегасайенс», с коллективами ученых, их профессиональной деятельностью, текущими проектами и разработками.

В рамках олимпиады «Я – профессионал» организуется образовательный форум, который будет включать значительную часть мероприятий (лекций, экскурсий, др.), целью которого является

формирование устойчивого интереса к исследовательской деятельности на уникальных научных установках класса "мегасайенс".

Формируется научная повестка лаборатории перспективных технологий мегасайенс МФТИ. В рамках одного из направлений, проведена поисковая научно-исследовательская работа: выполнен анализ современного состояния исследований, основных направлений в мировой науке и выявление научных конкурентов в области перспектив создания координатных детекторов на основе строу для применения в экспериментах на источниках нейтронов. Для этого учитывался опыт и наработки, которые получены в разное время в работе экспериментов на ускорителях

Опыт применения заимствуется из экспериментов на ускорителях в радиационных полях высокой интенсивности для определения траектории частиц, в которых применяются несколько типов детекторов. Одними из наиболее часто используемых координатных детекторов являются многопроволочные газонаполненные детекторы, такие как пропорциональные и дрейфовые камеры [Ю.В.Заневский, Проволочные детекторы элементарных частиц. Атомиздат, 1978; G.Charpak et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 62 (1968) 262; A.H.Walenta, J.Heintze and B.Schürlein, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 92, (1971) 373].

Многопроволочная пропорциональная камера (МПК) представляет собой систему из большого количества тонких параллельных проволочек, расположенных в одной плоскости и являющихся анодами, которые находятся в газовом объеме между двумя плоскими параллельными друг другу и аноду катодами (сплошными или проволочными). В типичном случае анодные проволочки удалены друг от друга на 2 мм и находятся на расстоянии 4 - 6 мм от катодов. Разность потенциалов между анодом и катодом несколько кВ. Такие параметры МПК обеспечивают газовое усиление 10^{*4} - 10^{*5} и пропорциональность амплитуды сигнала энергии, оставленной частицей в объеме газа [G.Charpak, D.Rahm and H.Steiner, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 80 (1970) 13]. При прохождении заряженной частицы через камеру, образовавшиеся вдоль следа частицы электроны ионизации двигаются в электрическом поле к ближайшим анодным проволочкам, где происходит их лавинное размножение. Электроника регистрирует сигнал с каждой проволочки. Таким образом, приходящие сигналы указывают координаты частицы в МПК с точностью $\sigma=s\sqrt{12}$, где s- расстояние между соседними анодными проволочками. Типичное пространственное разрешение МПК составляет 600 – 700 мкм [Клаус Групен, Детекторы элементарных частиц, Сибирский хронограф, Новосибирск, 1999]. Энергетическое разрешение пропорциональной камеры ~ 30%.

Дрейфовая камера, появившаяся в семидесятые годы прошлого века, является проволочным газонаполненным детектором (как и пропорциональная камера), в котором координата частицы определяется измерением времени дрейфа электронов в газе от места ионизации (пролёта частицы) до сигнальных анодных проволочек. В дрейфовой камере чередуются расположенные в одной плоскости анодные и катодные проволочки, формирующие дрейфовые промежутки (ячейки).

Расстояние между анодными проволочками обычно составляет до нескольких сантиметров. Пространственное разрешение дрейфовой камеры около 200 мкм. Измерение времени не дает возможности определить, с какой стороны от анода прошла частица. Для устранения этой неопределенности обычно используют два слоя дрейфовых ячеек. Эти слои сдвигают относительно друг друга на половину ширины ячейки. Дрейфовые камеры могут быть как плоскими, так и цилиндрическими.

Частным случаем дрейфовой камеры являются детекторы на основе тонкостенных дрейфовых трубок (строу) [W.W.Ash et al., Nucl. Instr. and Meth. A 261 (1987), 399; Г.Д.Кекелидзе, В.Д.Пешехонов, Прецизионные трековые детекторы на основе тонкопленочных дрейфовых трубок (straw), Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2002, Т.33]. Строу обладают рядом преимуществ, таких как минимальное количество их собственного вещества, высокие пространственно-временные параметры и способность работать в сильных радиационных полях, а также гибкость конструктивных решений при создании детекторов и сравнительно низкая стоимость. Все это позволяет успешно применять координатные детекторы (трекеры) на основе строу в больших экспериментальных установках:

- эксперимент 831 (FOCUS) [J.Link, Proceedings of the 1997 ICFA School on High Energy Instrumentation], MECO/Mu2e [Takubo Y. et al. Development and Performance of Resistive Seamless Straw-Tube Gas Chambers // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 551. P. 271-284], Fermilab.

- эксперимент COMPASS, CERN [Abbon P. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 577. P. 455-518; Vyckov V. N. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2006. V. 556. P. 66-79].

- эксперимент ATLAS большого адронного коллайдера (LHC), CERN [Кекелидзе Г.Д. Создание детектора переходного излучения-трекера "В"-типа для установки АТЛАС большого адронного коллайдера : диссертация кандидата технических наук : 01.04.23 / ОИЯИ, Дубна, 2007; Inner Detector Technical Design Report. ATLAS TDR 5, CERN/LHCC/97-17. 1997].

- эксперимент PANDA, FAIR GSI [Wintz P. A Large Tracking Detector in Vacuum Consisting of Self-Supporting Straw Tubes // AIP Conf. Proc. 2004. V. 698. P. 789-792].

Координатные детекторы на основе строу часто используются как детекторы переходного излучения для идентификации заряженных частиц большой энергии по переходному излучению, испускаемому ими при пересечении границ раздела сред с различными диэлектрическими проницаемостями.

Преимущества использования координатных детекторов на основе строу по сравнению с координатными детекторами других видов являются:

- пространственное разрешение ~ 150 мкм;
- минимальная величина радиационной толщины детекторов на основе строу при возможности создания многоканальных детекторов с большим аксептансом;

- высокая радиационная стойкость, объясняемая постоянным обновлением рабочего вещества и широкими возможностями отбора необходимых для создания детекторов материалов;
- высокая локальная нагрузочная способность. Собственное быстродействие может достигать величины $\sim 10^{**7}$ 1/с;
- работа в достаточно широком диапазоне дифференциального давления газового наполнения;
- высокие эксплуатационные свойства с возможностями мониторинга и стабилизации рабочих параметров;
- широкие возможности оптимизации параметров оригинальных детекторов для решения частных экспериментальных задач;
- возможность создания гранулированных строу-детекторов, быстрых двумерных координатных детекторов в результате развития катодного считывания и реализации одновременного определения радиальных и продольных координат методом временного считывания.

Наиболее полный обзор особенностей использования строу в трековых детекторах приведен в работе [Peshekhonov, V.D. Coordinate detectors based on thin-wall drift tubes // Phys.Part.Nucl. 46 (2015) no.1, 94-122].

Конструктивные особенности и основные параметры трековых детекторов на основе строу на примерах выполненных исследований и разработок для экспериментов на ускорительных комплексах приводятся в работах [Howel B., Koltick D., Kobayashi M. Crimping: a Wire Fastening Technique in Wire Chamber Construction // Nucl. Instr. Meth. A. 1990. V. 289. P. 185-193; Bytchkov V. N. et al. Construction and Manufacture of Large Size Straw-Chambers of the COMPASS Spectrometer Tracking System // Part. Nucl., Lett. 2002. No. 2[111]. P. 64-73; Arai Y. et al. (SDC Collab.). A Modular Straw Drift Tube Tracking System for the Solenoidal Detector Collaboration Experiment. Part. Design // Nucl. Instr. Meth. A.1996. V. 381. P. 355-371; Hauviller K. et al. Radiation Hardness of Polysulphone and Polycarbonate Elements for LHC Detectors. JINR Commun. E14-98-245. Dubna, 1998. 11 p.]. Строу состоят из прецизионной пластиковой трубки, изготовленной из тонких пленок (лавсан, полиамид), внутренняя поверхность которой является проводящей и служит катодом, с установленной по ее оси анодной проволокой, концы которой закреплены. Для фиксации анодной проволоки часто используют капиллярные металлические трубки - пины, установленные в пластиковых концевых втулках. Для уменьшения гравитационного и электростатического смещения анода в длинных строу вдоль оси устанавливаются поддерживающие анод втулки (спейсеры) по одной на каждые 80-100 см длины анода. Каптон обладает лучшей радиационной стойкостью и более высокой температурой плавления, в связи с чем этот материал является наиболее часто используемым при изготовлении строу. Для внутреннего слоя стенки трубки обычно используют проводящие пленки с углеродным

наполнением (loaded film) или однородные пленки, покрытые тонким слоем полиимида с 55 % графита (coated film). Также используются однородные пленки с металлизацией алюминием или медью толщиной 1000-1500 ангстрем. Медное покрытие предпочтительнее алюминиевого, так как проводимость медного слоя значительно лучше, чем алюминиевого. Следует отметить, что работа выхода у Cu ~ 4,65 эВ и у Al ~ 4,28 эВ, следовательно, медный катод менее чувствителен к выбиванию электронов под действием ультрафиолета из области развития лавины на анодной проволочке. Для анода в зависимости от длины строу используют обычно золоченую вольфрамовую проволоку диаметром от 20 до 30 мкм с добавкой 3 % рения, что увеличивает диапазон ее упругого удлинения.

Подходы к описанию собственных параметров дрейфовых трубок изложены в работах [Oh S. H., Goshaw A. T., Robertson W. J. Construction and Performance of a 2.7 m Long Straw Drift Tube Prototype Chamber for the SSC // Nucl. Instr. Meth. A. 1991. V. 309. P. 368-376; Ogren H. et al. (represented the SDC Collab.). The Straw Tracker for the SDC Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 367, No. 1-3. P. 133-137; Bychkov V. N. et al. Some Characteristics of the Long Straw Drift Tubes. JINR Commun. E13-98-209. Dubna, 1998. 12 p.; Vasilyev S. E. et al. Signal Transmission Line for Large-Size Segmented Straw Detectors // Instr. Exp. Tech. 2008. V. 51, No. 6. P. 820-825.; Marzec J. et al. Signal Propagation in Straw Tubes with Resistive Cathode // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2000. V. 47, No. 1. P. 18-24; Lu C. et al. Proposal to the SSC Laboratory for Research and Development of a Straw-Tube Tracking Subsystem. SSC-PC-029. 1989. P. 1-49; Boie R. A. et al. Second Coordinate Readout in Drift Chambers by Timing of the Electromagnetic Wave Propagating Along the Anode Wire // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1988. V. NS28. P. 471-477]. Дрейфовую трубку можно рассматривать как волновод с волновым сопротивлением Z_0 . Волновое сопротивление можно оценить как $Z_0 = 60 \ln(R/r)$, что соответствует величине $Z \sim 360$ ом, а скорость прохождения электромагнитной волны по аноду составляет - 0,29 м/нс. Схема получения координатной информации следующая. Заряженная частица создает цепочку кластеров первичной ионизации вдоль своего трека. Измеряется время дрейфа ближайшего к аноду кластера и, тем самым, определяется радиальная координата прохождения заряженной частицы. Соотношение между измеряемыми временами и соответствующими им координатами, так называемые R-T зависимости, калибруются с использованием внешнего трекового детектора. Скорость дрейфа электронов в электрическом поле дрейфовых трубок в наиболее часто используемых газовых смесях Ar/CO₂ около 5см/мкс, или 20нс на 1 мм пути вдоль радиуса. Например, в строу диаметром трубок 10 мм полное время дрейфа составляет 100 нс. Координатное разрешение строу обычно находится в диапазоне от 100 мкм до 500 мкм в районе анодной проволочки. Для устранения лево-правой неопределенности строу камеры обычно содержат два слоя трубок, сдвинутых между собой на величину их радиуса. Стерео координата точки траектории частицы определяется по информации с нескольких различно ориентированных слоев строу камер.

Наличие в трекаре развернутых друг относительно друга камер на угол θ позволяет определять продольную координату Z вдоль анодов с точностью $Z / \sin \theta$. Например в эксперименте PANDA создан 27 - слойный детектор, в котором для части строу слоев был выбран угол наклона 3 градуса. Это позволило получить точность 4 мм для определения продольной координаты вдоль оси строу.

Представленный выше успешный опыт использования строу для создания координатных детекторов в экспериментах на выведенных пучках демонстрирует перспективность развития этой тематики. Коллективом лаборатории уже ранее получены первые результаты, демонстрирующие применимость трекаров на основе строу [CDR SPD <https://arxiv.org/abs/1408.3959>; I.Savin et al. Spin Physics Experiments at NICA-SPD with polarized proton and deuteron beams // EPJ Web of Conferences Volume 85, 2015]. В дальнейшем эти наработки, дополненные уникальными технологиями низкотемпературного напыления В10 на пленки (тонкопленочные покрытия карбида бора В4С), открывает перспективы для проектирования координатных строу-детекторов нейтронов и создания прототипов на базе ОИЯИ.

Приложения.

1. Перечень научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик.
Файл Прилож.1.3.4.pdf

1.3.5 Ресурсное и инфраструктурное обеспечение в 2021г. научно-образовательной лаборатории для реализации выполнения научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории. (Совместно с МФТИ. Договор 400/1984 от 23.11.2021).

В 2021 году готовится инфраструктура научно-образовательной лаборатории. Готовится помещение лаборатории и приобретается оборудование для ее технического оснащения, включая создание экспериментальных стендов (по результатам конкурсных процедур заключены договоры на поставку оборудования №Д21-554 от 13.12.2021, №Д21-553 от 14.12.2021, №Д21-578 от 15.12.2021). Лаборатория позволит проводить обучение перспективным технологиям создания детекторов нейтронов (тонкостеночные дрейфовые трубки, детекторы ультрахолодных нейтронов, микроструктурные газоразрядные детекторы и др.), разработки программного обеспечения моделирования и анализа данных для проектирования и работы на исследовательских станциях нейтронных источников (ROOT, Geant4, GARFIELD, FPGA и др.). В рамках лаборатории также будет разработан экспериментальный практикум, который будет включен в состав разрабатываемого альтернативного курса для студентов третьего года бакалавриата. Осваиваемые обучающимися методы являются современными и универсальными и позволят выпускникам вовлекаться в научную работу исследовательских организаций уже на этапе работы над выпускными квалификационными работами бакалавриата и магистратуры, а также выстраивать траекторию научной карьеры, продолжив работу в выбранных направлениях в аспирантуре. К руководству научно-исследовательскими работами привлечены ведущие ученые ОИЯИ, ведется работа по привлечению ученых и экспертизы ведущих исследовательских центров и коллабораций, которые внесут вклад в разработку перспективных технологий и решений применительно для исследований с использованием источников нейтронов (ESS, ILL, NA62, NA64, DONE, SHIP и др.). Достигнута договоренность о проведении стажировок студентов в исследовательских группах исследовательских реакторов ИБР-2М (Россия), ВВР-К (Казахстан), ILL (Франция).

В результате исполнения обязательств по договору № 400/1984 от 23.11.2021 г. выполнены работы и получены следующие результаты:

1. Создана научно-образовательная лаборатория для проведения научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также элементов и систем экспериментальных станций.

2. Сформирован перечень научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории в 2022 г.

3. Создано ресурсное и инфраструктурное обеспечение в 2021г. научно-образовательной лаборатории для реализации выполнения научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории.

Выполненные работы удовлетворяют условиям договора, технического задания, календарного плана.

Приложения.

1. Акты по расходам на ресурсное и/или информационное обеспечение лаборатории. Файл Прилож.1.3.5.pdf

1.3.6 Реализация образовательной программы для подготовки специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня»:

Модуль 1 «Нейтронные детекторы»

Модуль 2 «Прикладная нейтронная физика»

Модуль 3 «Проектирование интеллектуальных систем»

Модуль 4 «Электроника и автоматика физических установок»

(совместно с Унив. «Дубна». Договор 400/1980 от 22.11.2021).

Для выполнения мероприятий приказом №3477 от 14 октября 2021 г. «О выполнении работ и утверждении состава рабочей группы по гранту в форме субсидий» сформирована и утверждена рабочая группа (ПРИЛОЖЕНИЕ А).

Приказом № 3478к от 14 октября 2021 года (ПРИЛОЖЕНИЕ Б) организован курс повышения квалификации с 14.10.2021 по 01.12.2021 по дополнительной профессиональной программе «Автоматизация эксперимента в области нейтронной физики» в объеме 252 часа (ПРИЛОЖЕНИЕ В), утверждено расписание занятий, и зачислены 35 слушателей на места, финансируемые за счет средств гранта в форме субсидии (шифр 2021-951-ФП5-0011).

Целью реализации программы является – изучение передового опыта, закрепление теоретических знаний, приобретение практических умений и навыков в области нейтронных детекторов, прикладных исследований нейтронной физики, проектирования приборов для проведения и автоматизации экспериментов в области нейтронной физики.

Содержание дополнительной профессиональной программы «Автоматизация эксперимента в области нейтронной физики» и виды учебной деятельности разработаны в соответствии областям знаний и видам деятельности по направлениям реализации Федеральной программы, в частности, в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, области проведения синхротронных и нейтронных исследований. Результатом освоения программы является приобретение новых профессиональных компетенций в соответствии с профессиональным стандартом «Специалист-исследователь в области ядерно-энергетических технологий», утвержден приказом Минтруда России от «16» марта 2018 г. №149н [1.3.6.1]:

- ПК.1 Подготовка исходных данных, наладка экспериментальных стендов и установок для обеспечения выполнения научных исследований,
- ПК.2 Проведение расчетных исследований и измерений физических характеристик на экспериментальных стендах и установках,
- ПК.3 Обработка и анализ результатов расчетных исследований и экспериментальных измерений и составление отчетов по выполненным этапам работ.

Авторский коллектив дополнительной профессиональной программы «Автоматизация эксперимента в области нейтронной физики»:

- Андреев Олег Александрович, старший преподаватель кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», канд. техн. наук, ст. науч. сотр. АО «НИИ «Атолл»;
- Булавин Максим Викторович, начальник сектора нового источника и комплекса замедлителей ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук;
- Горбунов Николай Васильевич, доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Научно-экспериментальный отдел физики на CMS, ЛФВЭ ОИЯИ;
- Давыдов Евгений Александрович, доц. кафедры фундаментальных проблем физики микромира, канд. физ.-мат. наук;
- Кулин Герман Вячеславович, ст. науч. сотр. отделения ядерной физики ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук;
- Пискунова Оксана Ивановна, директор Инженерно-физического института, канд. техн. наук.
- Стрекаловский Олег Викторович, доц. кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», канд. техн. наук, ведущий инженер ЛЯР ОИЯИ.

Объем программы 252 часа, из них аудиторных - 204 часа (128 лекции, 76 часов интерактивные занятия) 32 часа - самостоятельная работа, 16 часов – промежуточная и итоговая аттестация. Программа и входящие в нее виды учебной деятельности реализована Соисполнителем самостоятельно, в том числе с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения. Для осуществления образовательного процесса использовано программно-аппаратные комплексы:

- общего назначения (операционная система (операционные системы), офисные приложения, средства обеспечения информационной безопасности, архиваторы, программы для работы с графическими, видео- и аудиофайлами);
- учебного назначения (интерактивные среды, OrCAD, MATLAB, LabVIEW).

Формирование электронной информационно-образовательной среды осуществлено с помощью программной системы дистанционного обучения Moodle (edu.uni-dubna.ru).

Образовательная программа содержит 4 модуля с возможностью одновременного освоения.

1) Модуль 1 «Нейтронные детекторы»

Объем модуля 54 часа, из них аудиторные - 50 часа, промежуточная аттестация – 4 часа.

Раздел 1.1 Дисциплина «Введение в нейтронную физику и нейтронную оптику»

Объем раздела 36 часов, из них лекции - 34 часа, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Кулин Герман Вячеславович, старший научный сотрудник отделения ядерной физики ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук.

Целью данного курса является формирование у слушателей знаний об оптических свойствах, проявляемых отдельными нейтронами и пучками частиц, а также о методах исследований, приборах и технологиях, в которых применяются эти свойства.

В процессе освоения данного курса слушатели знакомятся с основами физических понятий и процессов, относящихся к нейтронной оптике, изучают устройство и принципы работы измерительных приборов, построенных на данных физических процессах. Также слушатели знакомятся с методами исследований, основанными на применении изученной измерительной аппаратуры, и с существующими научно-исследовательскими программами в области нейтронной оптики.

Содержание раздела:

1. Введение. Открытие нейтрона и зарождение нейтронной физик. Ряд знаковых нейтронно-оптических экспериментов (дифракция нейтронов преломление нейтронной волны, нейтронный интерферометр, нейтронный микроскоп и т.п.)
2. Источники нейтронов. Нейтронный генератор. Ядерные реакторы. Spallation neutron source. Компактные нейтронные источники.
3. Основные свойства нейтрона. Масса. Спин. Заряд. Магнитный момент. ЭДМ.
4. Фундаментальные взаимодействия
Фундаментальные взаимодействия: сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное).
Обзор экспериментов
5. Рассеяние нейтронов на ядре. Длина когерентного рассеяния. Квазипотенциал Ферми, магнитное рассеяние, когерентное и некогерентное рассеяние
6. Дисперсия нейтронных волн Закон дисперсии нейтронных волн в веществе, показатель преломления, эффективный потенциал. Комплексный закон дисперсии, закон дисперсии в случае сильнопоглощающих веществ. Отражение и преломление нейтронных волн. Матричный метод и метод Паррата для расчета отражения и пропускания нейтронной волны от вещества и многослойных структур. Нейтронные интерференционные фильтры
7. Отражение и дифракция нейтронов на макроскопических объектах (зеркала, нейтронводы, суперзеркала, рефлектометрия, дифракция нейтронов, малоугловое рассеяние)
8. Поляризованные нейтроны (магнитный потенциал, прецессия спина в магнитном поле, спин-эхо, Ларморовская прецессия спина, радиочастотный спин-флиппер)
9. Квантовая нейтронная оптика (квантовые эффекты в нейтронной оптике, нестационарных квантовые эффекты)

10. Ультрахолодные нейтроны, источники УХН, эксперименты с УХН

Промежуточная аттестация по разделу 1.1 проведена в установленном расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ Г).

Раздел 1.2. Дисциплина «Основы физики нейтронных и синхротронных исследований»

Объем раздела 18 часов, из них лекции - 16 часа, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Давыдов Евгений Александрович, доцент кафедры фундаментальных проблем физики микромира, канд. физ.-мат. наук.

Целью данного курса является формирование у слушателей знаний о физике фундаментальных взаимодействий, лежащей в основе физических процессов, относящихся к нейтронному и синхротронному излучению.

Слушатели изучают ключевые моменты релятивистской физики, электродинамики, квантовой механики, Стандартной модели физики частиц, необходимые для понимания особенностей процессов излучения, распространения и поглощения нейтронов и синхротронного излучения. Также слушатели знакомятся с существующими и перспективными научно-исследовательскими программами в области нейтронных и синхротронных исследований, получают представление о существующих ограничениях и возможностях соответствующих технологий

Содержание раздела:

1. Обзор нейтронных и синхротронных исследований.

История нейтронных и синхротронных исследований. Действующие экспериментальные установки мирового уровня за рубежом и в России. Примеры фундаментальных исследований и коммерческих технологий на установках нейтронного и синхротронного излучения. Программа развития нейтронных и синхротронных исследований в России.

2. Физика нейтронов. Основные процессы нейтронной физики.

Нейтрон с точки зрения современной физики элементарных частиц. Фундаментальные свойства нейтрона. Самопроизвольный распад нейтрона. Характерные масштабы энергий нейтронной физики.

Взаимодействие нейтронов с веществом. Ядерные реакции с участием нейтронов. Дифракция нейтронов. Нейтронография.

3. Прикладные технологии нейтронной физики.

История развития прикладных технологий нейтронной физики. Перспективные направления развития новых технологий.

4. Физические основы нейтронных исследований на проектах «мегасайенс».

Обзор физических процессов, на основе которых реализуются исследования на установке «ПИК».

5. Физика излучения электромагнитных волн.

Теоретические основы излучения электромагнитных волн. Ускоренное движение заряда. Дипольное излучение. Движение заряда в магнитном поле. Циклотронное излучение. Квантовые ограничения.

6. Основы физики синхротронного излучения

Особенности ультррелятивистского движения заряженных частиц. Эффект Доплера. История открытия синхротронного излучения. Синхротронное излучение и его основные свойства. Характерные масштабы энергий физики синхротронного излучения.

7. Прикладные технологии физики синхротронного излучения.

История развития прикладных технологий физики синхротронного излучения. Перспективные направления развития новых технологий.

8. Физические основы синхротронных исследований на проектах «мегасайенс».

Обзор физических процессов, на основе которых реализуются исследования на установках «ИССИ-4», «СКИФ».

Промежуточная аттестация по разделу 1.2 проведена в установленные расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ Д).

2) Модуль 2. «Прикладная нейтронная физика»

Объем модуля 54 часа, из них аудиторные - 32 часа, самостоятельная работа – 18 часов, промежуточная аттестация – 4 часа.

Раздел 2.1 Дисциплина «Ядерные технологии материаловедения»

Объем раздела 36 часов, из них лекции - 12 часов, практические занятия – 4 часа, самостоятельная работа – 18 часов, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Булавин Максим Викторович, начальник сектора нового источника и комплекса замедлителей ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук.

Целью данного курса является формирование у слушателей понимания целей, задач и методов изучения радиационной стойкости материалов.

Слушатели изучают основы нейтронно-активационного анализа и особенности техники облучения образцов (в том числе крупногабаритных) реакторными нейтронами. Важной составляющей курса является ознакомление слушателей с основами радиационной безопасности и мерами по снижению воздействия ионизирующего излучения на персонал. В частности, слушатели получают знания о методах использования робототехники при работе в опасной зоне.

Содержание раздела:

1. Введение в дисциплину

Актуальность и практическая значимость работ по изучению радиационной стойкости материалов. Направление исследований, текущие цели и задачи изучения радиационной стойкости различных видов материалов

2. Изучение изменения структуры и свойств материалов под действием высоких полей ионизирующего излучения

Материалы и методы, используемые в изучении радиационной стойкости. Облучательная установка, виды экспериментов и типы образцов, нейтронно-активационный анализ, полупроводниковый детектор для восстановления спектра.

Понятие о спектре нейтронов, плотности потока нейтронов и флюенсе. Виды нейтронов по энергиям (быстрые, резонансные, медленные, холодные, ультрахолодные нейтроны). Методы удаления «ненужных» нейтронов из спектра при облучении. Расчет дозы облучения (плотности потока, флюенса нейтронов и т.д.) в зависимости от типа облучаемого материала.

3. Постановка эксперимента по облучению. Восстановление нейтронного спектра

3.1 Техника эксперимента по облучения образцов реакторными нейтронами (на примере облучательной установки и вертикального канала ИБР-2, облучательных каналов реактора типа ВВЭР (ИЯУ, Узбекистан) и т.д.). Подготовка образцов для облучения. Облучение крупногабаритных объектов. Изучение различных характеристик образцов электронных компонент во время облучения, в режиме реального времени

3.2 Экспериментальное определение флюенса нейтронов после облучения при помощи нейтронно-активационного анализа. Градиент флюенса. Использование полупроводникового детектора на основе сверхчистого германия в нейтронно-активационном анализе. Полуэмпирическое восстановление спектра нейтронов.

4. Изучение свойств материалов после облучения. Перемещение и транспортировка радиоактивных образцов. Обращение с твердыми радиоактивными отходами (РАО) после облучения

4.1. Изучение физических, механических, химических и др. свойств материалов после облучения

4.2. Максимально-допустимые дозы облучения для персонала, работающего в радиационно-вредных условиях труда. Меры по снижению воздействия ионизирующего излучения на человека. Понятие периода полураспада. Обращение с РАО после облучения. Жидкие и твердые РАО. Захоронение высокорadioактивных образцов

4.3. Роботизированные манипуляторы для перемещения радиоактивных образцов. Программирование и управление роботом с пневматическим захватом. Транспортировка образцов после облучения

5. Проект «Исследование радиационной стойкости материалов на реакторе ИБР-2»

Промежуточная аттестация по разделу 2.1 проведена в установленные расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ Е).

Раздел 2.2 Дисциплина «Коммерциализация научных исследований и разработок»

Объем раздела 18 часов, из них лекции - 16 часов, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Пискунова Оксана Ивановна, директор Инженерно-физического института, канд. техн. наук.

Целью данного курса является формирование у слушателей целостной системы знаний, описывающих процесс коммерциализации результатов научно-технической деятельности в области нейтронных и синхротронных исследований.

Слушатели изучают виды, способы защиты и методы оценки объектов интеллектуальной собственности, методы генерации новых идей, способы коммерциализации научно-технических разработок.

Содержание раздела:

1. Научно-техническая деятельность и её результаты. Основные понятия и определения. Научно-исследовательская работа (НИР). Основные этапы НИР. Опытно-конструкторская работа (ОКР). Основные этапы ОКР. Научно-технический результат.

2. Объекты интеллектуальной собственности как результат научно-технической деятельности. Классификация объектов интеллектуальной собственности

Определение интеллектуальной собственности. Изобретение. Полезная модель. Промышленный образец. Ноу-хау. Права на интеллектуальную собственность. Патент. Системы классификации патентной информации. Национальные системы классификации. Международные системы классификации.

3. Патентоспособность и патентная чистота

Определения. Критерии патентоспособности. Правовые основания для проверки на патентную чистоту. Этапы проверки на патентную чистоту

4. Творчество: методы генерации и поиска новых идей

Индивидуальные и командные методы. Латеральное мышление. Метод «шести шляп». Теория решения изобретательских задач. Метод морфологического анализа. Метод фокальных объектов. Метод мозгового штурма. Метод Дельфи. Синектика.

5. Учет и оценка стоимости объектов интеллектуальной собственности: необходимость и значение

Особенности получения и использования интеллектуальной собственности (ИС). Характеристики рынка ИС. Оценка интеллектуальной стоимости. Методы оценки ИС

6. Разработка инноваций.

Понятие инновации. Характеристика понятия инновация. Виды инноваций. Возникновение инноваций. Этапы генерации инноваций. Перспективные области внедрения инноваций.

Тема 7. Компании типа Start Up

Определение термина стартап-компания. Характеристика стартапов. Этапы развития стартапов. Системы управления инновационными проектами.

Тема 8. Инновационные технологии

Определение понятия технология. Структура технологии. Классификация технологий. Инновационные технологии. Виды инновационных технологий. Внедрение инновационных технологий. Методы внедрения. Жизненный цикл технологии.

Промежуточная аттестация по разделу 2.1 проведена в установленном расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ Ж).

3) Модуль 3 «Проектирование интеллектуальных систем»

Объем модуля 72 часа, из них аудиторные – 68 часов, промежуточная аттестация – 4 часа.

Раздел 3.1 Дисциплина «Функциональное моделирование сложных систем»

Объем раздела 36 часов, из них лекции - 10 часов, практические занятия – 24 часа, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Горбунов Николай Васильевич, доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», к.т.н., ведущий научный сотрудник Научно-экспериментальный отдел физики на CMS, ЛФВЭ ОИЯИ.

Целью данного курса является формирование у слушателей знаний о функциональном моделировании иерархических проектов.

Слушатели изучают пакет компьютерных программ OrCAD, предназначенный для автоматизации проектирования электроники, и приобретают навыки моделирования и анализа электрических схем.

Содержание раздела:

1. Начало работы в OrCAD 17.2

2. Создание иерархических проектов

Создание принципиальной схемы

3. Создание задания на моделирование и вывод результатов моделирования

4. Анализ электрических цепей постоянного тока
Параметрическое моделирование электрической схемы на постоянном токе
5. Анализ электрических цепей на переменном токе
Моделирование электрической схемы на переменном токе
6. Анализ шума
Моделирование шумов электрической схемы
7. Температурный анализ
Моделирование шумов электрической схемы
8. Анализ электрических цепей методом Монте-Карло
Моделирование шумов электрической схемы
9. Анализ наихудшего случая
10. Анализ электрических цепей с магнитной связью
11. Создание и редактирование стимулов
12. Проблемы сходимости и сообщения об ошибке
13. Анализ линий передачи информации
Моделирование линий передачи
14. Цифровое моделирование
Моделирование цифрового счетчика
15. Смешанное моделирование. Функциональное моделирование
16. Целевые функции
Анализ результатов моделирования с применением целевых функций
17. Редактирование и создание PSpice модели

Промежуточная аттестация по разделу 3.1 проведена в установленном расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ И).

Раздел 3.2 Дисциплина «Введение в обработку экспериментальных данных с использованием нейронных сетей»

Объем раздела 36 часов, из них: лекции - 6 часов, практические занятия – 28 часов, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Андреев Олег Александрович, старший преподаватель кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», канд. техн. наук., старший научный сотрудник АО «НИИ «Атолл».

Целью данного курса является формирование у слушателей знаний об обработке данных научных экспериментов посредством использования нейронных сетей.

Слушатели изучают задачи, методы, алгоритмы, устройство искусственной нейронной сети. Приобретают умения и навыки построения искусственной нейронной сети в среде научных и инженерных расчетов MATLAB.

Содержание раздела:

1. Введение

Краткий исторический обзор развития искусственных нейронных сетей. Искусственная нейронная сеть сейчас: задачи, методы, алгоритмы, устройство. MATLAB как среда научных и инженерных расчетов. Закрепление навыков работы в MATLAB

2. Перцептрон

Модель перцептрона в MATLAB. Обучение и симуляция перцептрона в MATLAB на модельном примере. Многослойный перцептрон. Модель многослойного перцептрона в MATLAB. Обучение и симуляция многослойного перцептрона в MATLAB по экспериментальным данным

3. Сети кластеризации

Самоорганизующиеся карты Кохонена. Модель самоорганизующейся карты Кохонена в MATLAB. LVQ-сети. Модель LVQ-сети в MATLAB. Исследование выборки экспериментальных данных с использованием нейросетевых алгоритмов кластеризации

4. Радиально-базисные сети. Модель радиально-базисной сети в MATLAB. Аппроксимация функции радиально-базисной сетью

5. Сети произвольной архитектуры. Создание нейронных сетей произвольной архитектуры в MATLAB

6. Пред- и постобработка данных при работе с нейронными сетями.

Промежуточная аттестация по разделу 3.2 проведена в установленном расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ К).

4) Модуль 4 «Электроника и автоматика физических установок»

Объем модуля 72 часа, из них аудиторные - 54 часа, самостоятельная работа – 14 часов, промежуточная аттестация – 4 часа.

Раздел 4.1 Дисциплина «Автоматизация физико-технических процессов на экспериментальных нейтронно-физических установках реактора ИБР-2»

Объем раздела 36 часов, из них: лекции 6 часов, практические занятия – 14 часов, самостоятельная работа – 14 часов, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Булавин Максим Викторович, начальник сектора нового источника и комплекса замедлителей ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук.

Целью данного курса является формирование у слушателей практико-ориентированных знаний о методах проведения экспериментальных нейтронных исследований на действующей физической установке – научно-исследовательском реакторе ИБР-2.

Слушатели детально изучают методы замедления нейтронов, использование криогенной аппаратуры, влияние облучения на измерительную установку. Также слушатели получают знания о широком спектре методов определения и контроля параметров протекающих процессов, таких как температура, чистота, расход газа.

Содержание раздела:

1. Медленные нейтроны как инструмент для исследования материалов методом их рассеяния. Стационарные и импульсные реакторы. Метод по времени пролета на импульсных источниках. Спектрометры и системы окружения образца. Замедление нейтронов. Медленные нейтроны. Получение медленных нейтронов. Холодные замедлители нейтронов
2. Шариковый холодный замедлитель нейтронов реактора ИБР-2

Принцип работы шарикового холодного замедлителя нейтронов реактора ИБР-2. Система управления и контроля холодного замедлителя. Принцип работы основных устройств и систем замедлителя. Криогенные гелиевые установки для охлаждения камеры замедлителя

3. Основные элементы системы управления и контроля холодного замедлителя:

- Методы получения мелких твердых фракций (шариков, таблеток) правильной формы при криогенных температурах. Капельница – устройство для изготовления твердых шариков для холодного замедлителя реактора ИБР-2 в жидком азоте,
- Испытательные стенды шарикового холодного замедлителя. Вакуум и методы течеискания. Методы измерения температуры (термодиоды, терморезисторы, термопары). Приборы и методы для определения чистоты рабочего газа замедлителя (газоанализаторы и хроматографы),
- Методы загрузки замороженных шариков в камеру замедлителя при криогенных температурах. Методы определения расхода газа в трубопроводе (трубка Пито, сопло Вентурри, диафрагмы). Методы контроля движения твердых шариков в трубопроводе сложной конфигурации при криогенных температурах (газодинамический и оптический методы). Определение количества шариков в камере замедлителя во время и после загрузки (газодинамический метод, метод камеры-обскуры, использование сцинтиллятора). Программное обеспечение системы управления и контроля

4. Изменение свойств материалов холодных замедлителей нейтронов при облучении:

- Приборы и методы определения количества радиолитического водорода, образующегося в камере замедлителя, под действием облучения (использование газгольдера, хроматография),
- Исследование свойств материалов холодных замедлителей после облучения (изменение структуры, измерение вязкости, плотности). Влияние облучения материалов на деградацию потока холодных нейтронов с поверхности холодного замедлителя.

5. Индивидуальные консультации.

Промежуточная аттестация по разделу 4.1 проведена в установленные расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ Л).

Раздел 4.2 Дисциплина «Автоматизация экспериментальных источников нейтронов и синхротронного излучения»

Объем раздела 36 часов, из них: лекции 28 часов, практические занятия - 6 часов, промежуточная аттестация – 2 часа.

Преподаватель: Стрекаловский Олег Викторович, доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», к.т.н., ведущий инженер ЛЯР ОИЯИ.

Целью данного курса является формирование у слушателей знаний об автоматизации экспериментальных источников нейтронов и синхротронного излучения.

Слушатели изучают экспериментальные установки для проведения нейтронных и синхротронных исследований, электронику для спектрометрического тракта, архитектуру и элементы системы автоматизации экспериментов. Приобретут навык использования технологий фирмы NI для автоматизации экспериментальных исследований.

Содержание раздела:

1. Экспериментальные установки для исследования с нейтронами.

Системы автоматизации в промышленности и научных исследованиях. Основные элементы автоматизированной системы. Базовые установки ОИЯИ для исследований с нейтронами – реактор ИБР2 и ИРЭН. Реактор ПИК. Подсистемы, входящие в общую структуру управления базовой установкой

2. Экспериментальные установки – источники синхротронного излучения.

СИБИРЬ2, ВЭПП. Программы научных исследований на этих установках

3. Лазер на свободных электронах. Исследования с применением синхротронного излучения

4. Методы детектирования, применяемые при регистрации нейтронов, гамма-квантов и заряженных частиц. Газоразрядные камеры, сцинтилляционные детекторы, полупроводниковые детекторы

5. Применение нейтронных методик для элементного анализа, определения состава вещества, неразрушающих методов контроля вещества, системах радиационной безопасности, определении времени жизни исторических объектов
6. Электроника для спектрометрического тракта
Предусилители, усилители формирователи, АЦП, ВЦП, ЗЦП, анализаторы, дискриминаторы импульсов, счетчики. Защита измерительных каналов от помех. Источники помех. Методы экранирования и заземления. Гальваническая развязка
7. Современные методы цифровой обработки сигналов при регистрации заряженных частиц.
n-гамма разделение сигналов
8. Современный рынок электронных устройств для работы с излучениями.
Фирмы CAEN, ORTEC, Canberra, Phillips как поставщики измерительного оборудования для экспериментальных исследовательских установок. Открытые магистрально-модульные системы NIM, PXI, VME, VXI, CAMAC
9. Архитектура автоматизированной системы управления
Устройства распределенного сбора данных и управления. Проблемы синхронизации и одновременности при сборе и анализе экспериментальной информации. Удаленные хранилища данных. Облачные вычисления
10. Промышленные сети, применяемые в физическом эксперименте
Сети на основе последовательного канала, CAN, ProfiBUS, MODBUS, DCON. Промышленный Ethernet. Беспроводные локальные сети
11. Особенности управления многокомпьютерными системами. Планирование эксперимента. Анализ требований. Симуляция поведения сложной системы с большим числом детекторов. Управление проектом
12. Применение логических контроллеров и регуляторов при проведении экспериментальных исследований. Средства разработки управляющей программы для ПЛК. Язык релейных диаграмм. MMI (интерфейс человек – машина) и SCADA программы. Роль операционной системы. Статические и динамические параметры
13. Программное обеспечение для разработки систем автоматизации. Особенности систем реального времени. Встраиваемые системы автоматизации. Применение ПЛИС
14. Системы «жесткого» реального времени на примере решений реконфигурируемого ввода-вывода фирмы NI. Платформы для создания встраиваемого и компактного оборудования. Системы управления CompactRIO
15. Технологии фирмы NI для автоматизации экспериментальных исследований Применение специализированных пакетов для сбора экспериментальных данных и управления

физическим экспериментом. Среда графического программирования LabView. Контроллеры и управление ими в среде LabView

16. Технологии создания быстрых коммутирующих и защитных систем на базе ПЛИС. Системы управления с обратной связью. Методы регулирования. Реализация ПИД – регулятора и регулятора с нечеткой логикой в среде LV. Математический аппарат, применяемый для анализа систем управления. Цифровая обработка сигналов на системном уровне с использованием LabView

17. Аппаратное резервирование.

Промежуточная аттестация по разделу 4.2 проведена в установленные расписанием занятий сроки. Зачет получили 35 слушателей (оценочная ведомость ПРИЛОЖЕНИЕ М).

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

Таблица 1.1 - Списочный состав лиц, прошедших обучение по программе дополнительного профессионального образования повышения квалификации «Автоматизация эксперимента в области нейтронной физики» в объеме 252 часа с указанием реквизитов документов, выданных по итогам прохождения обучения

№	Фамилия, имя, отчество	Регистрационный документ	Номер документа
1.	Абраменко Павел Валерьевич	14832	502412187992
2.	Агадуллин Мурат Рафитович	14833	502412187993
3.	Бажин Антон Сергеевич	14834	502412187994
4.	Брагин Данила Романович	14835	502412187995
5.	Вазенмиллер Юлия Павловна	14836	502412187996
6.	Вертихин Александр Алексеевич	14837	502412187997
7.	Ветров Сергей Сергеевич	14838	502412187998
8.	Горбунов Артемий Александрович	14839	502412187999
9.	Дубенскова Алина Александровна	14840	502412188000
10.	Индюкова Мария Дмитриевна	14841	502412188001
11.	Кашникова Татьяна Васильевна	14842	502412188002
12.	Клименко Ольга Павловна	14843	502412188003
13.	Козлов Дмитрий Николаевич	14844	502412188004

14.	Комарова Анастасия Евгеньевна	14845	502412188005
15.	Кузнецов Александр Андреевич	14846	502412188006
16.	Кузнецов Александр Сергеевич	14847	502412188007
17.	Курылёв Владимир Андреевич	14848	502412188008
18.	Кутинова Ольга Васильевна	14849	502412188009
19.	Машинкин Владимир Сергеевич	14850	502412188010
20.	Нездоровин Артур Николаевич	14851	502412188011
21.	Оводов Александр Сергеевич	14852	502412188012
22.	Пименов Егор Андреевич	14853	502412188013
23.	Пименов Михаил Андреевич	14854	502412188014
24.	Попов Александр Алексеевич	14855	502412188015
25.	Рыспаев Искандер Таирович	14856	502412188016
26.	Сатыбалдиева Саглар Кененбаевна	14857	502412188017
27.	Сенькин Валерий Иванович	14858	502412188018
28.	Слаутин Михаил Константинович	14859	502412188019
29.	Стамгазиева Акманар Жумажанкызы	14860	502412188020
30.	Тихомирова Ксения Михайловна	14861	502412188021
31.	Уланова Ирина Ивановна	14862	502412188022
32.	Устинов Дмитрий Валерьевич	14863	502412188023
33.	Фердерер Валерий Эдуардович	14864	502412188024
34.	Хамитова Динара Райхатовна	14865	502412188025
35.	Шпилевская Виктория Станиславовна	14866	502412188026

Приложения.

1. Модули образовательной программы для подготовки специалистов. Файл Прилож.1.3.6_1.pdf
2. Оценочные ведомости. Файл Прилож.1.3.6_2.pdf

1.3.7 Проведение в 2021г. конференции обучающихся и исследователей в возрасте до 39 лет по тематике исследований (совместно с Унив. «Дубна». Договор 400/1980 от 22.11.2021).

Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» проведена 2-3 декабря 2021 года в университете «Дубна». ПРИЛОЖЕНИЕ Р - скриншоты страниц сайта <http://conf.uni-dubna.ru/> с информацией об анонсе Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред», ПРИЛОЖЕНИЕ С - страница сайта <http://conf.uni-dubna.ru/> с информацией об анонсе Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред».

Приказ «Об организации и проведении Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» от 14 октября 2021 г. № 584 - ПРИЛОЖЕНИЕ Т.

Тематика конференции:

- Исследования конденсированных сред с помощью рассеяния нейтронов,
- Разработка и моделирование станций нейтронного рассеяния,
- Детекторы нейтронного излучения,
- Детекторная электроника,
- Методика нейтронного эксперимента.

Организаторы конференции:

- Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований,
- Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Университет «Дубна» (государственный университет «Дубна»),
- Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,
- Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»,
- Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института ядерных исследований Российской Академии наук,
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.

Программный комитет:

- Швецов Валерий Николаевич, канд. физ.-мат. наук, директор Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка – председатель;
- Белушкин Александр Владиславович, д-р физ.-мат. наук, начальник отделения нейтронных исследований и разработок в области конденсированных сред ЛНФ ОИЯИ;
- Боднарчук Виктор Иванович, канд. физ.-мат. наук, начальник Научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ;
- Гафуров Марат Ревгеревич, д-р физ.-мат. наук, заместитель директора по научной деятельности Института Физики ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»;
- Горбунов Николай Васильевич, канд. техн. наук, доц. Государственного университета «Дубна» ведущий науч. сотр. Научно-экспериментального отдела физики на CMS ЛФВЭ ОИЯИ;
- Кравцов Евгений Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, проф., главный науч. сотр. Лаборатории квантовой наноспинтроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук;
- Малахов Александр Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой Государственного университета «Дубна», советник при дирекции ЛФВЭ ОИЯИ;
- Садыков Равиль Асхатович, канд. физ.-мат. наук, ведущий науч. сотр. Лаборатории нейтронных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт ядерных исследований» Российской Академии наук.

Организационный комитет

- Крюков Юрий Алексеевич – председатель Конференции, проректор по научной и инновационной деятельности, доц., канд. техн. наук;
- Пискунова Оксана Ивановна - ученый секретарь Конференции, директор Инженерно-физического института, канд. техн. наук;

- Стифорова Елена Геннадьевна, проректор по образовательной деятельности, доц., канд. юрид. наук;
- Давыдов Евгений Александрович, доц., канд. физ.-мат. наук;
- Клименко Ольга Павловна, старший преподаватель.

Конференция проведена 2-3 декабря в университете «Дубна» (конференц-зал 1-300), подключение участников онлайн осуществлялось посредством системы для видеоконференцсвязи Google Meet.

В работе конференции приняли участие 70 молодых ученых университета «Дубна», ОИЯИ, высших учебных заведений Российской Федерации и ближнего зарубежья. Программа конференции включала 31 доклад по тематике исследований.

Таблица 1.3.7.2 - Программа Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» (ПРИЛОЖЕНИЕ Т)

Время	МЕРОПРИЯТИЯ
2 декабря 2021 года	
9:00-10:00	Регистрация участников конференции
10:00-10:30	Открытие Конференции Приветственная речь ректора государственного университета «Дубна» Д.В. Фурсаева, Директора Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ В.Н. Швецова
	Пленарная Сессия Председатель: Давыдов Евгений Александрович, к.ф.-м.н. доцент кафедры фундаментальных проблем физики микромира
10:30-10:50	<u>Суслопарова А.Е.</u> , Курбаков А.И. Особенности кристаллической и магнитной структуры соединений A_2MnTeO_6 ($A=Li, Na, Ag, Tl$) (онлайн) <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия</i>
10:50-11:10	<u>Матвеева А.Н.</u> ¹ , Зобкало И. А. ¹ , Meven M. ² , Sazonov A. ² , Hutanu V. ² Сложное взаимодействие между магнитными системами 3D и 4F в мультиферроике $DY_1-XHOXMNO_3$ ($X=0, 0.24$) (онлайн) ¹ <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия</i> ² <i>RWTH Aachen University, Garching, Germany</i>
11:10-11:30	<u>Сёмкин М.А.</u> ¹ , Урусова ^{2,3} Н.В., Бескровный ⁴ А.И., Пирогов ^{1,3} А.Н. Магнитные структуры литий/никель/кобальт ортофосфатов (онлайн) ¹ <i>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия</i> ² <i>Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия</i> ³ <i>Институт естественных наук и математики УрФУ, Екатеринбург, Россия</i>

	⁴ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия
11:30-11:50	<u>Девятериков Д.И.</u> ¹ , Кравцов Е.А. ¹ , Жакетов В.Д. ² , Никитенко Ю. В. ² Наблюдение гелимагнетизма в тонких пленках Ду и Но и в сверхрешетке Ду/Но (онлайн) ¹ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия ² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия
11:50-12:10	<u>Даулбаев О.</u> ^{1,2} , Исаенко Л.И. ^{3,4} , Богдзель А.А. ¹ , Лобанов С.И. ^{3,4} , Креницын П.Г. ^{3,4} , Милков В.М. ¹ , Белушкин А.В. ^{1,5,6} Сравнительное исследование монокристаллов LiInSe ₂ для регистрации тепловых нейтронов (онлайн) ¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия ² Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан ³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия ⁴ Институт геологии и минералогии, СО РАН, Новосибирск, Россия ⁵ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия
12:30-12:50	<u>Стрекаловский А.О.</u> ¹ , Каманин Д.В. ¹ , Пятков Ю.В. ^{1, 2} , Горяинова З.И. ¹ , Кузнецова Е.А. ¹ , Солодов А.Н. ¹ , Стрекаловский О.В. ^{1, 3} , Жучко В.Е. ¹ Наблюдение фрагментации осколков деления из реакции ²³⁵ U(n _{th} , f) при пересечении ими твердотельной фольги ¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия ² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия ³ Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия
12:50-13:10	<u>Комендо И.Ю.</u> ^{1,2} , Досовицкий Г.А. ^{1,2} , Коржик М.В. ^{2,3} , Фёдоров А.А. ^{2,3} , Мурашев М.М. ² Неорганические сцинтилляторы для позиционно-чувствительных детекторов нейтронов (онлайн) ¹ НИЦ «Курчатовский институт» - ИРЕА, Москва, Россия ² НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия ³ Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Республика Беларусь
13:10-13:30	<u>Сулов И.А.</u> ^{1,2} , Камнев И.И. ¹ ; Немченко И.Б. ^{1,2} ; Шевчик Е.А. ¹ Новый пластмассовый сцинтиллятор для регистрации нейтронов ¹ Объединенный институт ядерных исследований ² Государственный университет «Дубна»
14:30-14:45	Трансляция Стендовых Докладов
	Пленарная Сессия (продолжение) Председатель: Давыдов Евгений Александрович, к.ф.-м.н. доцент кафедры фундаментальных проблем физики микромира
14:45-15:05	<u>Романцова А.Н.</u> , Семочкина Ю.П., Бадретдинов Т.М., Жирник А.С., Смирнова О.Д. Частота полихроматофильных эритроцитов с микроядрами в периферической крови мышей после пролонгированного гамма-нейтронного облучения (онлайн) НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия
15:05-15:25	<u>Ратушняк М.Г.</u> , Семочкина Ю.П., Жирник А.С., Смирнова О.Д., Посыпанова Г.А. Повреждение ДНК и индукция старения в нейральных стволовых клетках мыши при действии гамма-нейтронного излучения (онлайн) НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

15:25-15:45	<u>Дрожжов К.А.</u> , <u>Голосовский И. В.</u> Порошковый дифрактометр высокой светосилы D3 для реактора ПИК <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия</i>
15:45-16:05	<u>Пшеничная А.Г.</u> Моделирование нейтронного дифрактометра DIPOL для реактора ПИК (онлайн) <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия</i>
16:05-16:25	<u>Усманов О.В.</u> , <u>Зобкало И.А.</u> , <u>Киреенко Ю.М.</u> Трехосный спектрометр холодных нейтронов IN2 (онлайн) <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия</i>
16:25-16:45	<u>Дьячков М.В.</u> , <u>Ульянов В.А.</u> , <u>Сыромятников В.Г.</u> , <u>Калинин С.И.</u> , <u>Колхидашвили М.Р.</u> , <u>Соловей В.А.</u> Тестовый Нейтронный Рефлектометр (ТНР) в зале ГЭК РК ПИК <i>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия</i>
16:45-17:05	<u>Гапон И.В.</u> ^{1,2} , <u>Кузьменко М.О.</u> ¹ , <u>Тропин Т.В.</u> ¹ , <u>Авдеев М.В.</u> ¹ Рефлектометр GRAINS: состояние и перспективы (онлайн) ¹ <i>Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия</i> ² <i>Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, г. Чернобыль, Украина</i>
17:05-17:15	Заключительное заседание по итогам работы сессий, выступления, дискуссии
Стендовые Доклады	
	<u>Антропов Н.О.</u> ^{1,2} , <u>Хайдуков Ю.Н.</u> ^{3,4,5} , <u>Кравцов Е. А.</u> ^{1,2} , <u>Макарова М.В.</u> ^{1, 2} , <u>Проглядо В.В.</u> ¹ , <u>Устинов В. В.</u> ¹ Спин флоп переход в искусственных ферромагнетиках ¹ <i>Институт Физики металлов, Екатеринбург, Россия</i> ² <i>Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия</i> ³ <i>Институт исследований твердого тела им. Макса Планка, Штутгарт, Германия</i> ⁴ <i>Исследовательский источник нейтронов Хайнца Майера-Лейбница (MLZ), Гархинг, Германия</i> ⁵ <i>НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, МГУ, Москва, Россия</i>
	<u>Никова Е.С.</u> ^{1,2} , <u>Саламатов Ю.А.</u> ¹ , <u>Кравцов Е.А.</u> ^{1,2} Использование резонансного взаимодействия нейтронов с атомами гадолиния в рефлектометрии поляризованных нейтронов ¹ <i>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия</i> ² <i>Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, Россия</i>
	<u>Саламатов Ю.А.</u> ¹ , <u>Кравцов Е.А.</u> ¹ Возможности метода фазово-амплитудных функций в теоретическом анализе процессов распространения нейтронов в многослойных наногетероструктурах ¹ <i>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия</i>

	<p><u>Якунина Е.М.</u>¹, Кравцов Е.А.^{1,2}, Проглядо В.В.¹, Хайдуков Ю.Н.^{3,4} Структура и магнетизм в многослойных наносистемах Fe/MgO/Cr/MgO/Fe ¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия ²Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия ³Max-Planck Institute for Solid State Research, Штутгарт, Германия ⁴Max Planck Society Outstation at the FRM-II, Гархинг-бай-Мюнхен, Германия</p>
	<p><u>Макарова М.В.</u>^{1,2}, Кравцов Е.А.^{1,2} Исследование поверхности пленки CR/GD/CR МЕТОДАМИ XRR И PNR ¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия ²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия</p>
3 декабря 2021 года	
	<p>Пленарная Сессия (Онлайн Участники) Председатель: Давыдов Евгений Александрович, к.ф.-м.н. доцент кафедры фундаментальных проблем физики микромира</p>
10:00-10:20	<p>Петрова М.О.^{1,2} Концепция детектора тепловых нейтронов типа плоскопараллельная резистивная камера для установок ИБР-2 ¹Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия ²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия</p>
10:20-10:40	<p><u>Подлесный М.М.</u>^{1,2}, Боднарчук В.И.¹, Милков В.М.¹, Балагуров А.М.¹, Бобриков И.А.¹, Богдзель А.А.¹, Даулбаев О.^{1,3}, Дроздов В.А.¹, Петрова М.О.^{1,4}, Швецов В.В.^{1,4} Детектор обратного рассеяния для Фурье дифрактометра высокого разрешения на реакторе ИБР-2 (онлайн) ¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия ²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия ³Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан ⁴Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия</p>
10:40-11:00	<p><u>Курилкин А.К.</u>¹, Колесников А.Г.^{1,2}, Подлесный М.М.¹ Моделирование детектора тепловых нейтронов с борным конвертером в GEANT4 (онлайн) ¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия ²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия</p>
11:00-11:20	<p><u>Швецов В.В.</u>, Богдзель А.А., Дроздов В.А., Мурашкевич С.М., Приходько В.И. Системы сбора данных для экспериментов на реакторе ИБР-2 Объединенный институт ядерных исследований</p>
11:20-11:40	<p><u>Зернин Н.Д.</u> Автоматизация эксперимента на примере новой системы управления прерывателем нейтронов на Фурье-дифрактометре высокого разрешения импульсного реактора "ИБР-2" (онлайн) Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия</p>
11:40-12:00	<p><u>Стамгазиева А.Ж.</u>^{1,2}, Попов Р.Н.¹, Алтынов А.В.¹, Гапон И.В.^{1,3} Разработка системы автоматического контроля вакуума (онлайн) ¹Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия ²Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области "Университет "Дубна", г. Дубна, Россия</p>

	³ <i>Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, с Чернобыль, Украина</i>
12:20-12:40	<u>Бучный Д.А.</u> ^{1,2} , Литвин В.С. ¹ , Трунов Д.Н. ¹ , Марин В.Н. ¹ , Аксенов С.Н. ¹ , Садыков Р.А. ¹ Моделирование и расчет оптимальных параметров блока детекторов «СФЕРА» (онлайн) ¹ <i>Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия</i> ² <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия</i>
12:40-13:00	<u>Баутин В.В.</u> , Горбунов Н. В., Еник Т. Л., Саламатин К. М. Применение ВММЗ в накамерной электронике для нейтронной физики и физики высоких энергий <i>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия</i>
13:00-13:20	<u>Устинов В.В.</u> , Афанасьев С.В., Кутинова О.В., Сухов Е.В. Детектор нейтронов для исследования эта-ядер <i>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия</i>
13:20-13:40	<u>Свечников С.Ю.</u> , Горбунов Н.В., Горбунов И.Н. Обзор источников ионизирующего излучения, используемых для изучения радиационной стойкости материалов <i>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия</i>
13:00-14:00	<u>Голев А.Д.</u> ¹ , Горбунов И.Н. ² Использование машинного обучения для поиска аномалий при контроле качества набора данных на экспериментах в физике высоких энергий ¹ <i>Лаборатория информационных технологий, ОИЯИ, Дубна, Россия</i> ² <i>Лаборатория физики высоких энергий, ОИЯИ, Дубна, Россия</i>
14:00-14:10	Официальное закрытие и подведение итогов работы конференции

Приложения.

1. Документы по организации конференции. Файл Прилож.1.3.7.pdf

1.3.8 Разработка программы дополнительного профессионального образования (повышения квалификации) «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов археологического профиля (совместно с К(П)ФУ. Договор 400/2008 от 03.12.2021).

Содержательная часть совпадает с п. 1.3.1.

Приложение.

1. Учебный план образовательной программы, оценочные материалы, методические материалы.
Файл. Прилож.1.3.8..pdf

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках первого этапа исследований был выполнен ряд научных и научно-методических работ в соответствии с утвержденным планом-графиком. Получены важные результаты по структуре и характеристикам тонкопленочных структур, содержащих слои гадолия (Gd) или кадмия (Cd). Исследованиями подтверждено высокое качество создаваемых структур, которые обладают толщинами напыляемых слоев, соответствующих номинальным, низкими значениями межслойных шероховатостей. Установленное высокое качество полученных тонкопленочных структур позволяет заключить, что рассматриваемые системы могут быть использованы в качестве элементов детекторных технологий в дальнейшем.

Проведена масштабная работа по подготовке инфраструктуры для создания опытно-экспериментального участка по нанесению тонкопленочных бор содержащих покрытий. В рамках этой части исследований выполнена значительная научно-методическая работа:

1. Исследовано влияние режимов вакуумного магнетронного распыления на характеристики пленки карбида бора В4С, осаждаемой на металлические подложки (алюминиевые листы, пластины из нержавеющей стали, алюминиевая и медная фольга). По результатам исследования определены оптимальные толщины слоя карбида бора, которые с одной стороны сохраняют качество покрытия, с другой стороны обеспечивают максимальную степень конверсии нейтронного излучения.

2. Разработана конструкция магнетрона, имеющего высокий коэффициент использования материала мишени – карбида бора В4С. Полученный результат важен с точки зрения экономической эффективности использования данной технологии для массового производства детекторов нейтронов. Мишень для магнетрона, обогащенная изотопом ^{10}B , является довольно дорогим продуктом, в связи с чем условия для его максимально эффективного использования представляются чрезвычайно важными.

3. Проведены тестовые напыления карбида бора В4С на полимерные пленки из лавсана (Mylar) и полиимида (Kapton). Использование полимерных основ для конвертера нейтронов из карбида бора В4С в детекторах нейтронов является нетривиальной технологической задачей, поскольку добиться устойчивого покрытия не удавалось пока никому. Успешные результаты, полученные в этой части исследовательского проекта, являются прорывными и позволят создавать детекторы с уникальными характеристиками.

4. Для дальнейшего развития техники напыления карбида бора В4С на полимерные основы начата реконструкция действующей вакуумной напылительной установки VSR300 под магнетронное нанесение на рулонные материалы. На первом этапе разработана конструкторская документация.

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

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

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

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

9. В рамках исследовательского проекта создается уникальный сцинтилляционный детектор СФЕРА для нового дифрактометра, создаваемого на импульсном источнике "РАДЭКС" на базе линейного ускорителя ИЯИ РАН. Методом Монте-Карло моделирования определены

оптимальные параметры детектора и его основных узлов. Разработана конструкторская документация для создания детектора и изготовлены некоторые его узлы.

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

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

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

В процессе выполнения проекта за отчетный период разработано три программы дополнительного профессионального образования, нацеленных на формирование новых компетенций у специалистов естественнонаучного, биомедицинского и археологического профиля. Разработаны учебные планы и календарные учебные графики программ дополнительного профессионального образования, фонд оценочных средств и система оценки знаний, методические текстовые и видеоматериалы.

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

Модуль 1 «Нейтронные детекторы»

Модуль 2 «Прикладная нейтронная физика»

Модуль 3 «Проектирование интеллектуальных систем»

Модуль 4 «Электроника и автоматика физических установок»

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

Проведена Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» проведена 2-3 декабря 2021 года в

университете «Дубна». В работе конференции приняли участие 70 молодых ученых университета «Дубна», ОИЯИ, высших учебных заведений Российской Федерации и ближнего зарубежья. Программа конференции включала 31 доклад по тематике исследований.

По итогам выполнения научных и научно-технических задач в рамках реализации проекта можно заключить, что все поставленные цели первого этапа достигнуты. Исследованы и разработаны технические и конструкторские решения по созданию детекторов тепловых и холодных нейтронов различного назначения, обладающих уникальными характеристиками по размерам детектирующей площади, скорости счета, временного и пространственного разрешения. Начато создание материальной базы для реализации найденных технических и конструкторских решений на практике.

С материалами о ходе выполнения исследовательской программы проекта можно ознакомиться на сайте: <http://flnph.jinr.ru/ru/structure/dcmrd/dsc/research-areas-2>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1.1.1.1] Stefanescu, I., et al., Nucl. Instr. Meth. A, 2013, vol. 727, p.109–125, doi:10.1016/j.nima.2013.06.003
- [1.1.1.2] Piscitelli F., et al, JINST.2013.vol.8.p.04020
- [1.1.1.3] Lacy J.L., et al, IEEE Trans. NS 2013.vol.60. N2.p.1140-1146
- [1.1.1.4] Kohli M., et al, Nucl. Instr. Meth. A, 2016, vol. 828, p.242-249
- [1.1.1.5] Anastasopoulos M., et al, JINST, 2017, 12, P04030, doi:10.1088/1748-0221/12/04/P04030
- [1.1.1.6] Piscitelli F., et al, JINST, 2017.vol.12. p03013, doi:10.1088/1748-0221/12/03/P03013
- [1.1.1.7] Kirstein O., et al., POS, 2015, vol. 227, p. 029, doi:10.22323/1.227.0029
- [1.1.1.8] Høglund C., et al., J. Appl Phys, 2012, vol. 111(10), 104908, doi:10.1063/1.4718573
- [1.1.1.9] S. Schmidt, et al., J. Mater. Sci., 2016, 51:10418–10428, doi:10.1007/s10853-016-0262-4
- [1.1.2.1] Д.А. Д.В. Духопельников «Магнетронные распылительные системы. Ч. 1, Устройство, принцип работы, применение», М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [1.1.2.2] С.Д. Гришин, Л.В. Лесков, Н.П. Козлов «Электрические ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1975. – С. 272.
- [1.1.2.3] А.И. Морозов «Физические основы космических электрореактивных двигателей. Элементы динамики потоков в ЭРД» М.: Атомиздат, 1978. – С. 328.
- [1.1.2.4] ELCUT программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tor.ru/elcut/>
- [1.1.6.1] B. Guerard, R. Hall-Wilton, and F. Murtas, “Prospects in mpngds development for neutron detection,” arXiv:1410.0107, 2014.
- [1.1.6.2] C. Höglund, “B4c thin films for neutron detection,” Journal of Applied Physics, vol. 111, no. 10, 2012.
- [1.1.6.3] F. Piscitelli и др. «The Multi-Blade Boron-10-based Neutron Detector for high intensity Neutron Reflectometry at ESS» (Journal of Instrumentation (JINST) Volume 12, P03013, Published 15 March 2017; arXiv:1701.07623v1 [physics.ins-det] 26Jan 2017.

- [1.1.6.4] A. Andronic, C. Garabatos, D. Gonzalez-Diaz, A. Kalweit, and F. Uhlig, “A comprehensive study of rate capability in multi-wire proportional chambers,” *Journal of Instrumentation*, vol. 4, no. 10, p. P10014, 2009).
- [1.1.7.1] G. J. Cuello et al 2016 *J. Phys.: Conf. Ser.* 746 012020
- [1.1.7.2] S. Mühlbauer et al 2016 *NIMA* 832, 297–305
- [1.1.7.3] K. D. Berry et al 2012 *NIMA* 693, 179-185
- [1.1.7.4] K. Kanaki et al 2018 *JINST* 13 P07016
- [1.1.7.5] <https://www.caen.it/products/n1470/>
- [1.1.7.6] <https://www.caen.it/products/n6730/>
- [1.1.8.1] *Position-Sensitive Detection of Thermal Neutrons* / Edited by Convert P. and Forsyth. J.B. Academic Press Inc. London. 1983. 429 P.
- [1.1.8.2] Hall-Wilton R. // CREMLIN Workshop, May 13-16, 2018, St. Petersburg.
https://indico.frm2.tum.de/event/65/sessions/294/attachments/202/333/180513_PNPIInstr_10BDetectors_RJHW-reduced-size.pdf
- [1.1.8.3] Piscitelli F. and Van Esch P. // 2013 *JNST* 8 P04020.
- [1.1.8.4] Кащук А.П., Левицкая О.В.// *ЖТФ* 2020, том 90, вып. 5.
- [1.1.8.5] Van der Ende B.M., Rand E.T., Erlandson A., Li L. // *Nucl. Instr. and Meth. A* 894. 2018. P.138–144.
- [1.1.8.6] Lacy J.L., et al. // *IEEE Trans. NS* v. 60. №2. 2003. P. 1140-1146.
<http://doi.org/10.1109/NSSMIC.2011.6154533>
- [1.1.8.7] Lacy J.L., et al. // *Journal of Neutron Research* 22 (2020) 353–369 353 DOI 10.3233/JNR-190138.
- [1.1.8.8] Piscitelli F., et al. // *JNST* 9 P03007 2014.
- [1.1.8.9] Guerard B., Buffet J. // Patent US Patent App. 13/038,915, no. 20110215251.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/54/45/a7/6c07ac4c63bb62/US20110215251A1.pdf>
- [1.1.8.10] Piscitelli F. *Boron-10 layers, Neutron Reflectometry and Thermal Neutron Gaseous Detectors. Theses PhD.* 2013. 186 P.
https://www.ill.eu/fileadmin/user_upload/ILL/1_About_ILL/List_of_PhD_thesis/Piscitelli_PhDthesis_c.pdf
- [1.1.8.11] Stefanescu I., et al. // *Nucl. Instr. and Meth. A* 727 (2013) 109-125.
- [1.1.8.12] Stefanescu I., et al. // 2013 *JINST* 8 P12003; arXiv:1309.7789v1.
- [1.1.8.13] Кащук А.П., Левицкая О.В., Чураков А.В. // Патент № 174185 (2017).
- [1.1.8.14] Mauri G., et al. // *JNST* 13 P03004 2018.

- [1.1.8.15] Messi F., et al. The Multi-Blade: The 10B-based neutron detector for reflectometry at ESS // <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.058>
- [1.1.8.16] Кашчук А.П., Левицкая О.В., Чураков А.В. // Патент №183457 (2018).
- [1.1.8.17] Oed A. // Nucl. Instr. and Meth. A 263. 1988. P.62–68.
- [1.1.8.18] Buffet J.C., et al. // Nucl. Instr. and Meth. A554. .2005. P. 392-405.
- [1.1.8.19] Sauli F. // Nucl. Instr. and Meth. A386. 1997. P. 531–534.
- [1.1.8.20] Giomataris Y. et al. // Nucl. Instr. and Meth. A376. 1996. P. 29–35.
- [1.1.8.21] Fujiwara T., et al. // 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC); <https://ieeexplore.ieee.org/document/6829580>
- [1.1.8.22] Klein M., Schmidt C. J. // Nucl. Instr. and Meth. A628. 2011. P. 9-18.
- [1.1.8.23] Köhli M., et al. // Nucl. Instr. and Meth. A828. 2016. P. 242-249.
- [1.1.8.24] Uno S., et al. // Physics Procedia 26 (2012) 142 – 152.
- [1.1.8.25] Li Ke, et al. // Chinese Physics C Vol. 40, No. 7 (2016) 076002.
- [1.1.8.26] Muraro A., et al. // Eur. Phys. J. Plus (2021) 136:742.
<https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01707-2>
- [1.1.8.27] Pfeiffer D., et al. // arXiv:1501.05022v1 (2015), 2015 JINST 10 P04004.
- [1.1.8.28] Shoji M., et al. // 2012 JINST 7 C05003; doi:10.1088/1748-0221/7/05/C05003.
- [1.1.8.29] Tsiledakis G., et al. // Universe 2018, 4, 134; doi:10.3390/universe4120134.
- [1.1.8.30] Дубовский И.М., Лебедев В.Т., Серебров А.П.
<https://oiks.pnpi.spb.ru/media/muromets2016/%D0%94%D0%B5%D0%BD%D1%8C%203/%D0%94%D1%83%D0%B1%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf>
- [1.1.8.31] Schmidt C. J. et al. // 2010 J. Phys.: Conf. Ser. 251 012067; doi:10.1088/1742-6596/251/1/012067.
- [1.1.8.32] Geerits N. et al. // Rev. Sci. Instrum. 90, 125101 (2019);
<https://doi.org/10.1063/1.5123987>
- [1.1.8.33] Kashchuk A., et al. // 2020 JINST 15 C09041.
- [1.1.8.34] Kashchuk A., et al. // 2020 JINST 15 C09018._
- [1.1.8.35] Kashchuk A., et al.
[/https://indico.jinr.ru/event/2444/contributions/14611/attachments/11246/18486/Poster NTNPD2021%285%29%20v05.pdf](https://indico.jinr.ru/event/2444/contributions/14611/attachments/11246/18486/Poster%20NTNPD2021%285%29%20v05.pdf)
- [1.3.1.1] Положение о дополнительном образовании в ФГАОУ ВО «К(П)ФУ» / Утв. рект. И. Р. Гафуровым 19.02.2014 г. № 0.1.1.67-06/24/14. – Режим доступа:

https://kpfu.ru/docs/F106434081/pol_do_190214.pdf (дата обращения 10.11.2021).

[1.3.1.2] Федеральный закон Российской Федерации «Об образовании в Российской Федерации» от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ (в действующей редакции от 1.09.2021 г.).

[1.3.1.3] Приказ Министерства образования Российской Федерации «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по дополнительным общеобразовательным программам» (с изменениями на 30 сентября 2020 года).