

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

ТРУНОВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

**СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ
КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ И ОРГАНИЧЕСКОГО
СВЕТОВОДА**

1.3.2. – приборы и методы экспериментальной физики

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук,
Садыков Равиль Асхатович;

Москва, 2024 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. Обзор современных детекторов тепловых нейтронов, используемых в дифракционных экспериментах.....	15
1.1 Параметры исследовательских станций для дифрактометрических исследований.....	15
1.2 Основные требования, предъявляемые к детекторам тепловых нейтронов	17
1.2.1 Эффективность регистрации нейтронов	19
1.2.2 Загрузочная способность детектора.....	21
1.2.3 Разрешение детектора	24
1.2.4 Гамма-чувствительность	25
1.3 Линейные детекторы тепловых нейтронов	25
1.3.1 Газовые детекторы нейтронов.....	25
1.3.2 Детекторы с борным покрытием.....	27
1.3.3 Сцинтилляционные детекторы нейтронов	29
1.3.4 Выводы.....	31
1.4. Позиционно-чувствительные детекторы тепловых нейтронов.....	33
ГЛАВА 2. Создание сцинтилляционного детектора нейтронов	39
2.1 Одиночные детекторы нейтронов	41
2.1.1 Моделирование оптических параметров и создание прототипа	42
2.1.2 Оптимизация параметров.....	49
2.1.3 Управляющая электроника	56
2.1.4 Сравнение световых выходов с детекторами на основе WLS	63
2.1.5 Создание электроники для сбора и накопления данных	72
2.2 Позиционно-чувствительные сцинтилляционные детекторы	79
2.2.1 Моделирование оптических параметров.....	81
2.2.2 Изготовление прототипов детекторов	86
ГЛАВА 3. Тестирование детекторов нейтронов	89

3.1 Источники нейтронов, используемые для тестирования детекторов.....	90
3.2 Тестирование на установках ИЯИ РАН.....	94
3.2.1 Определение эффективности.....	99
3.3 Результаты тестирования позиционно-чувствительных детекторов.....	104
3.3.1 Линейный позиционно-чувствительный детектор.....	105
3.3.2 Двухмерный позиционно-чувствительный детектор.....	108
ГЛАВА 4. Многофункциональный дифрактометр “СФЕРА”	110
4.1 Назначение дифрактометра “СФЕРА”	110
4.2 Детекторы используемые в дифрактометре “СФЕРА”	110
4.3 Конфигурация разработанного дифрактометра.....	112
4.4 Электроника дифрактометра “СФЕРА”	116
4.5 Тестирование и калибровка детекторов.....	118
4.6 Выводы	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	124

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

SiPM(G-APD) — Кремниевый фотоумножитель

ПЧД — позиционно-чувствительный детектор

2Д ПЧД – двухмерный позиционно-чувствительный детектор

АЦП — аналого-цифровой преобразователь

ЗЦП — зарядо-цифровой преобразователь (зарядочувствительный АЦП)

TDC — Time to Digital converter, Время цифровой преобразователь

HRc — единица твердости по шкале Роквелла

WLS - Wavelength shifting, спектросмещающие волокна

PMMA – Полиметилметакрилат, органическое стекло

ПЛИС(FPGA) - Программируемая логическая интегральная схема

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

Нейтрон — тяжёлая элементарная частица, не имеющая электрического заряда, но имеющая магнитный момент. С помощью нейтронов возможно проведение исследований Структуры и динамики вещества. В связи с этим нейтроны могут быть полезны в ряде исследований, которые касаются фундаментальных взаимодействий и симметрии, а также исследования вещества. [1].

Благодаря особым свойствам нейтрона, таким как магнитный момент и высокая проникающая способность, становится возможным проведение исследований, которые невозможны или сложны при использовании синхротронных и рентгеновских методов исследования [2, 3]. К таким исследованиям относятся: исследования водородосодержащих веществ [4], объёмных веществ, изучение магнитных свойств [5, 6], томографические исследования [7] и другие.

Для этих целей во всем мире создано большое количество центров для изучения вещества с помощью нейтронов [8]. Помимо существующих центров, также происходит создание новых нейтронных центров, например ПИК (Россия) [9].

До настоящего времени в нейтронных центрах активно использовались различные детекторы на основе гелий-3. Изотоп гелий-3 обладает достаточно большим сечением захвата тепловых нейтронов (5320 барн) и поэтому на его основе возможно создание высокоэффективных детекторов тепловых нейтронов. Недостатками подобного типа детекторов являются высокая текучесть газа и сложность создания больших массивов детекторов.

Также в настоящее время наблюдается дефицит изотопа гелий-3, в связи с этим активно ведутся различные исследования по поиску и созданию альтернативных детекторов без использования этого изотопа [10].

Также в настоящее время стали появляться высокоэффективные сцинтилляторы [11] используемые для регистрации тепловых нейтронов. На основе этих сцинтилляторов возможно создание различных детекторов, параметры которых будут близки к гелиевым.

В связи с вышеизложенным становится актуальным изучение возможности создания сцинтилляционных детекторов нейтронов для дифракционных экспериментов в теоретическом и в прикладном аспекте.

Целью диссертационной работы является моделирование и разработка сцинтилляционных детекторов на основе $\text{ZnS (Ag):}^6\text{LiF}$, кремниевых фотоумножителей (SiPM) и органического прозрачного световода. А также исследование параметров полученных детекторов и оценка возможности их применения в дифракционных экспериментах и разработка многофункционального дифрактометра на основе этих детекторов. Дополнительно разрабатывалась электроника для управления и сбора данных для создания полноценной системы измерения — от детектирования нейтрона до проведения эксперимента и накопления данных.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

1. Провести анализ существующих детекторов нейтронов и установок для дифракционных исследований.
2. Провести моделирование оптических свойств пластикового прозрачного световода для оценки влияния длины световода на количество фотонов, дошедших до торцов.
3. Разработать и протестировать прототип одиночного нейтронного детектора. Провести сравнительное тестирование с детектором на основе WLS.
4. Провести работу по анализу существующей электроники для усиления сигналов с кремниевых фотоумножителей и разработать электронику для

регистрации фотонов с возможностью дискриминации гамма-излучения и теплового шума. Разработать метод увеличения загрузочной способности детекторов на основе кремниевого фотоумножителя. Разработать оригинальное программное обеспечение и систему считывания сигналов с детекторов нейтронов, используемых для времяпролетных измерений.

5. Разработать метод сбора фотонов для создание бесшовных детекторов и оптимизации сбора фотонов. Разработать высокоэффективный сцинтилляционный детектор тепловых нейтронов для дифракционных измерений, который возможно использовать в качестве замены гелиевых детекторов типа СНМ.

6. Провести исследования тестовых образцов на импульсных источниках нейтронов ИЯИ РАН для оценки возможности использования полученных детекторов в дифракционных экспериментах и сравнение с детекторами на основе гелий-3.

8. Провести оптическое моделирование позиционно-чувствительных сцинтилляционных детекторов нейтронов. Разработать метод вычисления координаты в подобном типе детекторов. На основе модельных данных и разработанного метода создать тестовые варианты детектора и провести определение координатного разрешения.

9. Разработать уникальную экспериментальную установку для дифракционных исследований, основанную на использовании кольцевых детекторов.

Научная новизна:

1. Впервые разработаны и протестированы сцинтилляционные многослойные детекторы нейтронов на основе прозрачного пластикового световода для дифракционных измерений, обладающие компактными размерами и высокой эффективностью регистрации нейтронов (70% для 1.8 А). За счет использования двух кремниевых фотоумножителей, расположенных в торцах

световода и используя схему совпадения, возможно полностью исключить тепловой шум. Используя суммирование сигналов возможно увеличить повысить соотношение сигнал/шум. Детекторы имеют в 4 раза более высокий световыход по сравнению с детекторами на основе WLS (для размера световода 5x5x60 мм), что позволяет использовать сцинтилляторы с большей эффективностью. На основе данного детектора возможно изготовление детекторов, обладающих возможностью определения типа излучения (нейтрон и гамма). На вариант данного детектора получен патент RU 2814061 C1.

2. Впервые было предложено использовать сверхширокоугольную линзу для сбора фотонов в детекторах с прозрачным световодом. Использование линзы для сбора фотонов со световода позволяет изготавливать большие массивы сцинтилляционных детекторов с отсутствием слепых зон. На метод съема фотонов и изготовления детекторов получен патент на полезную модель № 177857 U1.

3. Был разработан оригинальный метод компенсации времени восстановления кремниевого фотоумножителя, позволяющий увеличить загрузочную способность кремниевого фотоумножителя в 2.7 раза. На представленный метод получен патент № 2782417 C1.

4. Впервые предложена конструкция двухмерных позиционно-чувствительных детекторов, отличающихся от известных тем, что съём фотонов и определение координат происходит на основе анализа затухания фотонов в объёме световода двумя (для одномерного) или четырьмя (для двухмерного) кремниевыми фотоумножителями. Разработан метод определения координат на основе анализа амплитудного соотношения сигнала. Впервые проведены измерения и получены параметры координатного разрешения, достигаемого в подобном типе детектора.

5. Была создана уникальная экспериментальная установка “СФЕРА”, предназначенная для исследования кристаллической и магнитной структуры материалов методом Дебая-Шеррера. Установка основана на кольцевых детекторах нейтронов с возможностью определения текстуры, варьирования разрешения и углов захвата нейтронов. На экспериментальную установку получен

патент № 796123 С1. Разработаны оригинальные программные пакеты для управления и накопления данных установки “СФЕРА” (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022664139 и № 2022664140)

Практическая значимость.

1. Разработка и изготовление нейтронных детекторов на основе сцинтиллятора $ZnS(Ag):^6LiF$ в качестве замены детекторов на основе гелий-3 привело к улучшению важных характеристик дифрактометров источника ИН-06 ИЯИ РАН: повышение светосилы и разрешения, увеличение телесного угла захвата нейтронов.

2. Разработанный метод сбора фотонов с использованием сверхширокоугольной линзы позволяет уменьшить габариты детектора за счет размещения детектора фотонов параллельно световоду. Также становится возможно изготавливать сцинтилляционные детекторы с отсутствием мертвых зон, которые позволяют улучшить разрешение, светосилу и увеличить телесный угол захвата существующих и проектируемых дифрактометров.

3. Разработанный метод увеличения загрузочной способности позволяет снизить мертвое время детектора до физического минимума. Метод является универсальным и позволяет повысить загрузочную способность в других областях применения кремниевых фотоумножителей, таких как позитронно-эмиссионная томография, а также ЛИДАР (LIght DEtection And Ranging).

4. Разработанный метод определения координат, основанный на анализе амплитуды ограниченным количеством кремниевых фотоумножителей, позволяет существенно снизить стоимость детекторной системы за счет использования двух или четырех фотоприемников. Использование подобных позиционно-чувствительных детекторов позволяет расширить функциональные возможности существующих дифрактометров, в частности, добавить возможность определения текстуры образца.

5. Разработанная дифракционная установка “Сфера” обладает высоким телесным углом захвата излучения и широкими возможностями по настройке углов, позволяя реализовать широкий спектр дифракционных экспериментов. За счет высокого соотношения сигнал/шум одиночных сцинтилляционных детекторов и возможности суммирования детекторов, расположенных на одном кольце, возможно применение установки на низкоинтенсивных компактных источниках нейтронов.

Методология и методы исследования.

В рамках работы применяли следующие методы: нейтронные исследования, нейтронные дифракционные исследования, исследования электрических параметров детекторов, оптические исследования, моделирование методом Монте-Карло.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Многофункциональная экспериментальная “СФЕРА” установка для дифракционных исследований на монохроматическом и времяпролетном нейтронном пучке тепловых нейтронов, состоящая из 7 систем кольцевых детекторов. Каждое кольцо имеет диаметр от 300 мм до 600 мм, на котором расположены от 12 до 28 сцинтилляционных детекторов нейтронов, образующих сферу относительно исследуемого образца. Кольца могут перемещаться в диапазоне от 6 до 174 градусов относительно падающего пучка нейтронов. Данная установка позволяет проводить исследования кристаллической и магнитной структуры материалов методом Дебая-Шеррера.

2. Система считывания сигналов с детекторов нейтронов для времяпролетных измерений с функцией накопления гистограмм и шириной временного окна от 10 нс до 12.5 мкс. Оригинальные программные пакеты для накопления экспериментальных данных и настройки предусилителей детекторов нейтронов на основе SiPM.

3. Разработка линейных сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов для дифракционных экспериментов на основе пластикового прозрачного световода и съема фотонов двумя кремниевыми фотоумножителями. Одновременная регистрация сигнала с двух кремниевых фотоумножителей позволяет исключить тепловой шум детектора и повысить соотношение сигнал/шум, что позволяет добиться более высокой эффективности регистрации нейтронов. Сравнительное тестирование световодов на основе WLS и PMMA.

4. Результаты оптического моделирования и измерения тестовых образцов на импульсном источнике ИН-06 и РАДЭКС ИЯИ РАН.

4. Метод согласования размеров фотоприёмника и световода на основе использования сверхширокоугольной линзы с целенаправленно увеличенной дисторсией.

6. Метод увеличения загрузочной способности кремниевых фотоумножителей, основанный на компенсации заряда ячеек кремниевого фотоумножителя. За счет компенсации заряда ячеек, метод позволяет увеличить загрузочную способность кремниевого фотоумножителя в 2.7 раза.

7. Метод цифровой обработки сигналов от сцинтилляционных детекторов нейтронов с прозрачным световодом на основе анализа амплитудного соотношения, позволяющий определять координату события регистрации нейтрона с точностью от 5 мм до 10 мм.

Степень достоверности результатов. Научные результаты получены на основе экспериментальных материалов достаточных для получения статистически достоверных данных с использованием современных методов исследований, а также их апробацией на научных конференциях и семинарах, публикациями в печати и в сравнениях с результатами, полученными в других исследованиях.

Для численных расчётов и при написании программного обеспечения использованы алгоритмы, реализованные на языках программирования: LabView, Verilog и C++.

Апробация работы. Результаты данного исследования были представлены автором в виде докладов на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. Трунов Д.Н., Литвин В.С., и др. // Разработка сцинтилляционных детекторов, НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ-2015, с 22 по 26 декабря 2015 года.

2. Trunov D.N., Marin V.N. et. al., New type of scintillation detectors of thermal neutrons based on ZnS (Ag) /LiF and avalanche photodiodes. // International Conference on New Photo-Detectors (PD15), 06 - 09 July 2015, Moscow

3. Трунов Д.Н., Линейные и кольцевые детекторы на основе твердотельных сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов. // Научно-практическая конференция «Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития», 15–16 ноября 2016 г., ФАНО, Москва.

4. Trunov D.N., Litvin V.S. et. al., A new scintillation detectors based on SiPM and lightguides. // CMR-2017, Dubna, October 9-12, 2017

5. Trunov D.N., Marin V.N. et. al., Neutron Scattering Installation for In Situ High Pressure Studies // International Conference on Neutron Scattering 2017 (ICNS 2017), Daejeon, the Republic of Korea, July 9 to 13, 2017.

6. Trunov D.N., Litvin V.S., A new ring scintillation detector without blind areas for neutron diffraction // IV international conference on particle physics and astrophysics, 22-26 Oct. 2018

7. Trunov D.N., Litvin V.S. et. al., A new linear and ring neutron scintillation detector based on SiPM and lightguides // CREMLIN WP4 Workshop "Engineering for Advanced Neutron Instrumentation and Sample Environment" st. Petersburg 13-16 May 2018

8. Trunov D.N., Sadykov R.A., et. al. Neutron diffraction system based on a pulsed neutron source IN06 and RADEKS INR RAS // ECNS 2019, 30/06-5/07 2019

9. Trunov D.N., Multichannel scintillation neutron detector for microsample research under high-pressure // ECNS 2019, 30/06-5/07 2019

10. Д.Н. Трунов, Многослойный высокоэффективный сцинтилляционный счетчик нейтронов на основе SiPM и органического световода, РНИКС-2021.

11. Д.Н. Трунов, Т.И. Глушкова, В.Н. Марин, Р.А. Садыков, Сцинтилляционный детектор нейтронов на основе SiPM и ZnS:⁶Li, РНИКС-2021

12. Д. Н. Трунов, Многослойный высокоэффективный сцинтилляционный счетчик нейтронов на основе SiPM и органического световода, РНИКС-2021

13. D. N. Trunov, T. Glushkova, V. Marin, R. Sadykov, A. Polyushkin, Prototypes of neutron scintillation detectors based on zns(ag)/lif and SIPM, INTERNATIONAL CONFERENCE Condensed Matter Research at the IBR-2-2022, тезисы конференции стр. 132.

14. D.N. Trunov, T. Glushkova, V. Marin, E. Altynbayev, R. Sadykov, S. Axenov, SiPM and ZnS: Li⁶ based neutron detectors, RAD-2020, тезисы конференции стр. 83

15. Трунов Д.Н., Марин В. Н., Алтынбаев Е.В., Садыков Р. А. Позиционно-чувствительный детектор ионизирующих излучений на основе прозрачного световода и кремниевых фотоумножителей, MTSIIMS-2023

16. Д. Н. Трунов, Позиционно-чувствительный нейтронный детектор на основе пластикового световода и кремниевых фотоумножителей, Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред РНИКС-2023

17. Д. Н. Трунов, Времяпролетный многосекционный дифрактометр «Сфера», Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред (РНИКС-2023).

18. Р. А. Садыков, Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, В.С. Литвин, С.Н. Аксенов, Д.А. Бучный МНОГОДЕТЕКТОРНЫЙ ДИФРАКТОМЕТР СФЕРА, III Всероссийская научно-практическая конференция «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» (ЗМНИКС-2023) Екатеринбург, 21-22 сентября 2023 года.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы представлено в 16 публикациях, включая 9 [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20] статей в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 [21] препринте, 1 [22] патенте на полезную модель, 3 [23, 24, 25] патентах на изобретение, 2 свидетельствах о государственной регистрации программ для электронных вычислительных машин [26, 27].

Личный вклад автора. Все изложенные в диссертации результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

Структура и объём диссертации. Диссертация имеет объем 135 страницы и содержит введение, четыре главы, заключение, список сокращений, список литературы.

Диссертационная работа иллюстрирована 83 рисунками и 3 таблицами. Библиографический список содержит 89 литературных ссылок, в том числе 46 на иностранных языках.

ГЛАВА 1. Обзор современных детекторов тепловых нейтронов, используемых в дифракционных экспериментах

В настоящее время в России происходит развитие и создание современных исследовательских центров, таких как исследовательский реактор ПИК (г. Гатчина) [9], Импульсный нейтронный источник нейтронов «Омега» (г. Протвино) [28] и Проект DARIA [29].

Основную стоимость установок для нейтронных исследований составляют детекторы, особенно основанные на гелий-3. Связано это с ограниченной доступностью и стоимостью газа гелий-3 [30]. В связи с этим в настоящее время происходит развитие методов изготовления различных видов детекторов, которые смогут удовлетворять современным требованиям.

1.1 Параметры исследовательских станций для дифрактометрических исследований

Нейтронная дифрактометрия — метод исследования фазового состава и структуры кристаллических материалов. Данный метод основан на дифракции нейтронов, происходящей на периодической решетке кристалла. Кристалл рассматривается как набор атомных плоскостей, отражающих падающий луч, с сохранением равенства углов падения и отражения.

Нейтронная дифракция широко применяется в различных областях, таких как физика твердого тела, материаловедение и геология, и является универсальным методом исследования структуры веществ. При исследовании на постоянных источниках нейтронов, таких как реакторы, используются монохроматические дифрактометры, а на импульсных источниках - времяпролетные дифрактометры. Как правило, монохроматические приборы обладают более высокой разрешающей способностью, а времяпролетные — более широким диапазоном переданных импульсов.

На сегодняшний день наиболее распространенным методом дифракции является порошковая нейтронная дифракция. В основе метода лежит исследование образца, который представляет собой порошок или поликристалл. Это позволяет

производить рассеивание нейтронов при различных длинах волн и ориентациях образца относительно пучка. Это связано с тем, что для любой длины волны, всегда найдутся кристаллиты, ориентированные таким образом, что пучок будет падать под углом, соответствующим условиям, известным как условия Вульфа-Брегга:

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

Рассеяние на образце может происходить при любом угле, так как рассеивающие атомные плоскости кристаллитов, в общем случае, ориентированы относительно оси пучка (по φ) хаотично и равновероятно. Таким образом рассеянные нейтроны образуют кольца Шерерра. Особенностью времяпролетной дифракции является то, что рассеяние возможно при любом угле 2θ . Т.е., поставив лишь один точечный детектор под углом 2θ относительно пучка, возможно получить дифракционную картину в виде зависимости количества нейтронов, зарегистрированных детектором, от времени пролета.

Для повышения эффективности дифрактометров стремятся увеличить долю зарегистрированных рассеянных нейтронов путем увеличения площади детекторов либо увеличивая эффективность регистрации одиночных детекторов.

Исторически чаще применялись нейтронные дифрактометры со щелевой геометрией пучка. В таких дифрактометрах образцы в виде стержней, и пучок сфокусирован в вертикальной плоскости. Одним из плюсов такой геометрии является возможность исследовать большие объемы образца. Также с такой геометрией возможны высокие интенсивности нейтронов на образце, а также относительно простая конструкция дифрактометра. Образец в таких приборах окружен в горизонтальной плоскости линейными детекторами (счетчиками). Примером может служить дифрактометр «Геркулес» на импульсном источнике ИН-06 в ИЯИ РАН [31], дифрактометр SNAP на импульсном источнике SNS (ORNL, США) [32], а также Dream и Heimdal, разрабатываемые для импульсного источника ESS [33,34]. К недостаткам такой геометрии можно отнести зависимость интенсивности от размеров образца, искажения при малых углах, а также

невозможность исследовать анизотропию рассеяния, вызванную, например — текстурой.

В случае использования кольцевых детекторов становится возможно наблюдать анизотропию рассеяния, если детектор сегментированный, т.е. состоит из отдельных счетчиков. Примером такого прибора служит ДН-12 на импульсном реакторе ИБР-2м [35].

Поскольку рассеяние на порошковых времяпролетных дифрактометрах возможно под любым углом, то в современных установках создают детекторную систему из множества детекторов, расположенных по сферической поверхности с центром в позиции образца. Такая геометрия позволяет максимально эффективно использовать рассеянные нейтроны и получать одновременно множество дифрактограмм в широком диапазоне переданных импульсов. Примером может служить порошковый дифрактометр Polaris на источнике ISIS (Великобритания), где образец окружен блоками детекторов, составленных из сцинтилляционных детекторов, которые можно объединить в 5 базовых модулей для регистрации очень малых, малых, средних и обратных углов рассеяния. Размер каждого элемента позиционно-чувствительной матрицы составляет 5 мм, разрешение - от 0.3 до 2.7% в зависимости от угла [36].

1.2 Основные требования, предъявляемые к детекторам тепловых нейтронов

Нейтрон имеет большую проникающую способность, которая зависит от энергии нейтрона и состава среды, в которой они распространяются. Для тепловых нейтронов, используемых в дифракционных экспериментах, пробег составляет от долей мм до 10-20 мм (в зависимости от вещества). Это связано с отсутствием у нейтрона электрического заряда. Эффективные сечения взаимодействия нейтронов с электронами атома малы ($\sigma \approx 10^{-22}$ см²) по сравнению с сечением взаимодействия заряженной частицы с атомом ($\sigma \approx 10^{-16}$ см²).

Для регистрации нейтронов, в первую очередь важно сечение захвата нейтрона — величина, характеризующая вероятность взаимодействия элементарной частицы с атомным ядром или другой частицей. Качественно эффективное микроскопическое сечение можно трактовать как некоторую эффективную площадь, где происходит реакция. Наиболее существенные реакции, идущие под действием тепловых нейтронов, следующие [10]:

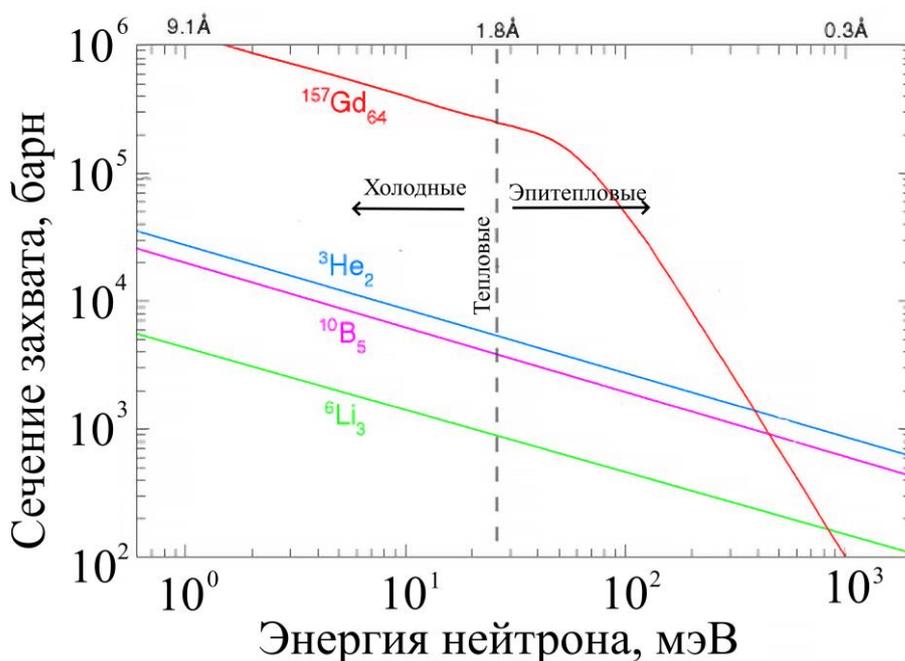
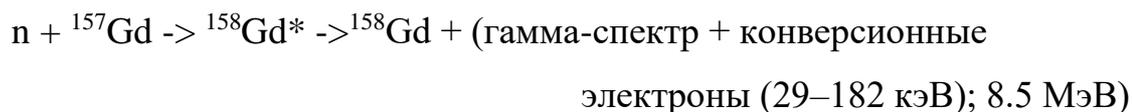
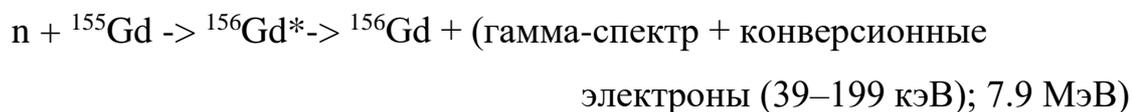
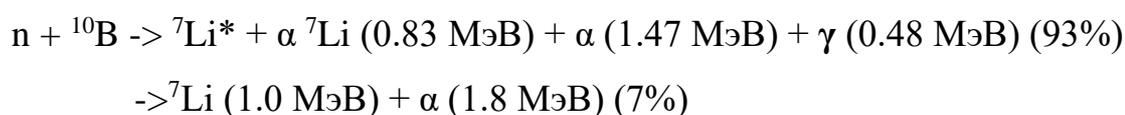


Рисунок 1 – График зависимости сечения захвата в зависимости от энергии нейтрона

На основе этих реакций построено детектирование тепловых нейтронов. В общем виде принцип построения детекторов показан на рисунке 2.

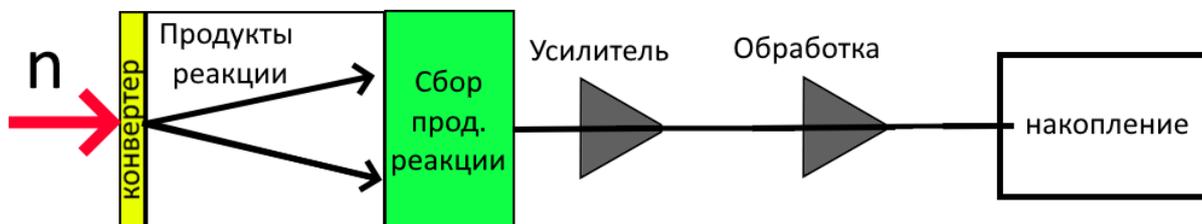


Рисунок 2 – Принципиальная схема дифракционных детекторов тепловых нейтронов

Нейтрон взаимодействует с веществом с высоким сечением захвата (такие, как ^3He , ^6Li , ^{10}B и другие), называемым “конвертер”. Образовавшиеся вторичные частицы от регистрации нейтрона (например фотоны, протоны, электроны и др.) конвертируются в электрический сигнал (в случае образования электронов - непосредственно сами электроны) и попадают на вход усилителя. Усилитель служит для увеличения уровня сигнала. Сигнал с усилителя попадает на электронику для обработки сигналов (дискриминатор, амплитудно-широтный анализ и др.) и в дальнейшем накапливается в устройстве для регистрации сигналов.

1.2.1 Эффективность регистрации нейтронов

Эффективность захвата тепловых нейтронов, в первую очередь зависит от сечения захвата и объёма вещества, используемого в качестве “конвертора”. В свою очередь, с увеличением объёма и плотности конвертера может возникнуть ситуации, когда продукты реакции не смогут выйти из объёма. Эффективность детектора определяется как отношение числа зарегистрированных нейтронов к числу нейтронов, попавших в детектор.

Лучшими по этому параметру считаются детекторы на основе гелий-3, где за счет высокого давления газа и высокого сечения поглощения (5320 барн) возможно

достичь эффективности порядка 90% (в зависимости от давления). Так же это достигается за счет того, что удается собрать все электроны и ионы, образовавшиеся в процессе конвертации.

Регистрация теплового нейтрона сцинтилляционными детекторами достигается за счет захвата нейтрона изотопами бор-10 и литий-6 с последующей конвертации продуктов реакции в фотоны сцинтиллятором. В качестве основного сцинтилляционного материала используется поликристаллический ZnS, активированный серебром или медью. Серебро или медь создают центры люминесценции, при активации которых излучается свет с длиной волны около 450 нм (для серебра) и 525 нм (медь) [37, 38].

В ZnS, активированного серебром, для преобразования одного фотона требуется 27 эВ, т. е. энергии α -частицы и тритона достаточно для образования $\sim 1.6 \cdot 10^5$ фотонов [38]. Пробег α -частицы и тритона составляет несколько микрон [39], а пробег фотонов зависит от толщины и оптимальным считается примерно 450 мкм [40]. Это накладывает ограничение на эффективность регистрации нейтронов одним слоем. Максимальная эффективность поглощения нейтрона одним слоем сцинтиллятора 0.45 мм может достигать 48% [41]. В качестве сцинтиллятора обычно используют ZnS (Ag): ^6LiF либо ZnS (Ag): $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$.

В детекторах на основе тонкопленочного конвертера из карбида бора или литиевой фольги значительная часть энергии реакции теряется в пленке конвертера, и лишь оставшаяся энергия идет на ионизацию газа. Детекторы на основе конвертера из карбида бора имеют низкую эффективность одного слоя (1-5% для нейтрона 1.8 Å), которая ограничена толщиной конвертера (1-3 мкм) [42].

В свою очередь для сцинтилляционных детекторов и детекторов с тонкопленочным конвертером возможно увеличение эффективности регистрации различными методами, такие как: увеличение количества слоев [42, 43], наклоном пластинок относительно траектории нейтрона [42], а также создания микроструктуры на поверхности конвертера [42].

1.2.2 Загрузочная способность детектора

Современные источники нейтронов позволяют получать достаточно большие потоки нейтронов (например, 1.2×10^{15} н/ (см² с) для постоянных источников [9,44] и 10^{18} н/ (см² с) [44] для импульсных. Для эффективного использования таких больших потоков нейтронов, детекторы должны обладать, в первую очередь, высокой эффективностью регистрации одновременно с высокой нагрузочной способностью. Загрузочная способность бывает локальная и интегральная. Локальная нагрузочная способность обозначает максимальную плотность потока нейтронов, которую способен регистрировать детектор на площади 1 см². В свою очередь, интегральная нагрузка обозначает максимальное количество частиц, которую может регистрировать детектор по всей площади. Интегральная нагрузка детектора в общем виде определяется:

- 1) Эффективностью регистрации нейтронов
- 1) Временем конвертации нейтрона
- 2) Временем сбора продуктов реакции
- 3) Быстродействию регистрирующей электроники
- 4) Быстродействию АЦП

Эффективность регистрации зависит от

Время конвертации нейтрона определяется в зависимости от типа конвертера. Для газовых детекторов это время реакции преобразования нейтрона во вторичные частицы. Для сцинтилляционных детекторов это время определяется послесвечением. Для ZnS (Ag):⁶LiF послесвечение имеет как быстрые компоненты (~4 нс, ~40 нс ~200-300 нс), так и медленные (4.52 мкс, 17.3 мкс, 82 мкс и т.д.) [45].

Время сбора продуктов реакции для газовых детекторов зависит от времени дрейфа. Электроны и ионы, образованные ионизирующей частицей, дрейфуют к соответствующим электродам, испытывая столкновения с нейтральными атомами или молекулами газа. Из-за своей низкой подвижности ионы обоих знаков получают мало энергии между столкновениями и ускоряются медленно. Развитие лавины останавливается, когда все свободные электроны достигают анода. Это

время зависит от параметров газа и электроники. Типичное время составляет 1-10 мкс [46].

При больших нагрузках решающее значение имеет время восстановления (до мс), которое связано с накоплением пространственного заряда. Положительный пространственный заряд увеличивает эффективный диаметр анода и снижает тем самым напряжённость поля. По мере удаления слоя положительных ионов от нити его экранирующее действие ослабляется и напряжённость поля вблизи анода становится достаточной для образования новой вспышки разряда.

Для детекторов на основе сцинтиллятора, в отличие от газовых, не происходит развитие лавины и время сбора продуктов реакции зависит от мертвого времени детектора фотонов. В качестве детекторов фотонов наибольшее распространение получили кремниевые фотоумножители (SiPM) и Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ).

Эти детекторы имеют достаточно низкое мертвое время (около 50 нс) по сравнению с длительностью послесвечения, и им можно пренебречь при оценке нагрузочной способности. Исходя из значений этих времен, подбирается время интегрирования усилителя. В большинстве случаев достаточно учитывать это время при расчете нагрузочной способности.

Быстродействие регистрирующей электроники. Любое регистрирующее устройство затрачивает на регистрацию события определенное время, в течение которого невозможно обработать правильно следующее событие (искажение за счет наложения сигналов).

Такой временной период называется «мертвым временем», и от него зависит быстродействие электроники. Мертвое время делится на два типа: непродлевающееся – не зависит от поступления событий в его пределах; продлевающееся – возникает после любого поступившего события независимо от его регистрации. В общем случае пропускная способность системы будет определяться продлевающимся мертвым временем усилителя и

непродлевающимся мертвым временем АЦП. Скорость регистрации для такой системы будет:

$$r = \frac{n}{\exp[n(T_w + T_r)] + n(\tau_{ADC} - T_w)H(\tau_{ADC} - T_w)}, \quad (2)$$

где T_w – длительность импульса усилителя, T_r – длительность переднего фронта импульса, τ_{ADC} – мертвое время АЦП, H – функция Хевисайда, n – максимальное количество событий:

$$H(\tau_{ADC} - T_w) = \begin{cases} 0 & \text{при } \tau_{ADC} \leq T_w \\ 1 & \text{при } \tau_{ADC} > T_w \end{cases}, \quad (3)$$

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) преобразовывает информацию, содержащуюся в полученном аналоговом сигнале, в цифровой код для дальнейшей обработки на основе измерения напряжения.

Число, получаемое на выходе АЦП, используется для адресации памяти и называется номером канала. Номер канала несет информацию об амплитудном значении сигнала. Амплитуда связана с измеряемой физической величиной. Максимальное количество каналов связано с разрядностью АЦП, т.е. с количеством дискретных значений напряжения, на которые может делиться весь рабочий диапазон входных (анализируемых) напряжений.

К быстрым методам амплитудно-цифрового преобразования относится поразрядное взвешивание. Принцип работы АЦП поразрядного взвешивания заключается в последовательном сравнении амплитуды анализируемого сигнала с напряжением цифро-аналогового преобразователя, уровень которого задается регистром. Время преобразования и, соответственно, мертвое время АЦП поразрядного взвешивания, определяется количеством сравнений, т.е. разрядностью. Мертвое время АЦП поразрядного взвешивания ~ 300 нс.

В среднем типичная загрузочная способность детектора для дифракционных экспериментов составляет около $1-2 \times 10^6$ [47].

1.2.3 Разрешение детектора

Разрешение дифракционной установки определяется как комплексная величина, состоящая из двух частей - разрешение оптической части и разрешения/ширины самого детектора.

Разрешение времяпролетного дифрактометра определяется соотношением

$$\Delta d/d = \{ \tau_p^2 / (k L \lambda)^2 + (\Delta\theta_0^2 + (d/2R)^2 + (s/2R)^2) \text{ctg}^2 \theta \}^{1/2} \quad (4)$$

где τ — длительность нейтронного импульса, L — пролетная база (суммарное расстояние замедлитель-образец-детектор), λ — длина волны нейтрона, $\Delta\theta_0$ — расходимость пучка, падающего на образец, θ — угол рассеяния, d , s — размеры (в плоскости рассеяния) детектора и образца, R — расстояние от образца до детектора.

Разрешение дифрактометра с монохроматическим пучком является довольно сложной функцией угла рассеяния или межплоскостного расстояния. Также оно зависит от мозаичности кристалла монохроматора, углов коллимации, размеров детекторов. Может быть описано формулами полученными в [48].

В общем случае детекторы для дифракционных экспериментов размещают в горизонтальной плоскости. Для одномерных линейных детекторов нейтронов одним из основных факторов, оказывающих влияние на разрешение, является ширина. Для такого типа детектора минимальная ширина, как правило, ограничена геометрическими размерами детектора. Для газовых детекторов типичный диаметр составляет от 8 мм. Для сцинтилляционных детекторов возможно создавать детекторы шириной от 1 мм.

Для позиционно-чувствительных детекторов разрешение детектора определяется точностью определения координаты, и может достигать 2 мкм для томографических нейтронных детекторов и быстродействующих координатных детекторов, названных микроструктурными детекторами, MPGD — Micro-Pattern Gaseous Detectors.

1.2.4 Гамма-чувствительность

Вне зависимости от типа источников нейтронов при дифракционных экспериментах возникает паразитное гамма-излучение. Оно может исходить как от самого источника нейтронов, так и от активации образца либо материалов вокруг установки. Паразитное гамма-излучение влияет на шум детектора. Поэтому в детекторах для дифракционных экспериментов одним из важных параметров является чувствительность к гамма-излучению.

Гелий-3 изначально слабо взаимодействует с гамма-излучением, и детекторы на его основе имеют чувствительность порядка 10^{-6} - 10^{-7} событий/фотон [49].

Сцинтилляционные детекторы более чувствительны к гамма-излучению. В подобных детекторах гамма-излучение возникает в самом конвертере и может приводить к ложному событию регистрации. В сцинтилляционном детекторе гамма-излучение создает вспышку фотонов длительностью до 50 нс и имеет меньшую амплитуду. Эта особенность позволяет отсеять его, используя дискриминатор. Типичное значение гамма-чувствительности составляет 10^{-7} [50].

В детекторах с борным конвертером событие от регистрации гамма-излучения имеет так же меньшую амплитуду. Установкой порога срабатывания дискриминатора возможно достичь значения гамма-чувствительности в 10^{-8} [42].

В случае, если к детектору предъявляются требования к более высокой гамма-чувствительности, возможно реализовать метод амплитудно-широтного анализа (PSD) и отсеять паразитное гамма-излучение полностью [51].

1.3 Линейные детекторы тепловых нейтронов

1.3.1 Газовые детекторы нейтронов

Детекторы с газовым наполнителем были одними из первых устройств, использованных для обнаружения и детектирования нейтронов. Использование изотопов гелия и бора позволило регистрировать нейтроны по вторичным продуктам реакции.

На рисунке 3 показана типичная схема для регистрации электронов от реакции захвата нейтронов с газонаполненным детектором.

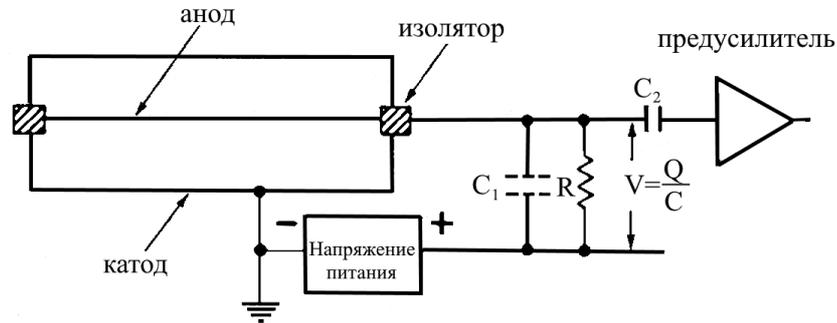


Рисунок 3 – Принципиальная схема регистрации нейтронов с газонаполненного детектора

Внешний вид газового детектора представляет собой металлический цилиндр с электрическим разъемом на одном конце (иногда на обоих концах для измерений с учетом возможности определения положения). Внутри под давлением находится нейтронно-чувствительный газ. При захвате нейтрона происходит образование облака электронно-дырочных пар. При подаче высокого напряжения на анод происходит разделение заряда этого облака, которое регистрируется усилителем формирователем.

Помимо гелий-3, достаточно часто используется также газ на основе бор-10. Поскольку элементарный бор не является газообразным, нейтронные детекторы, содержащие бор, могут использовать трифторид бора (BF_3) с обогащением до 96% по бор-10. Внешний вид детекторов представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Внешний вид детекторов нейтронов на основе гелий-3

Основные особенности такого детектора — это, в первую очередь, высокая эффективность регистрации нейтронов (50–90% для нейтронов 1–4 Å) и относительная простота изготовления. В России производится НПФ Консенсус. Также к основным плюсам можно отнести то, что возможно изготовление детекторов различной длины с различным давлением наполнения газом, что напрямую влияет на эффективность.

К минусам данного вида детектора стоит отнести низкое пространственное разрешение, связанное с необходимостью высокого давления газовой смеси, и пространственные ошибки, связанные с параллаксом [35]. Также в случае детекторов с трифторидом бора встает вопрос безопасности, так как газ является токсичным. Еще один недостаток подобного типа детекторов, это “старение” детектора. При каждом захвате нейтрона атомом бора образуется три атома фтора. При последующих захватах нейтронов, атомы фтора соединяются с образующимися электронами. Сначала данный процесс снижает амплитуду электрического импульса, а, в конечном счете, полностью прекращает образование выходного импульса.

Ограничение минимального диаметра детектора негативно сказывается на разрешении, что в свою очередь сказывается на качестве проведения нейтронного эксперимента, и ограничивает использование этих детекторов.

1.3.2 Детекторы с борным покрытием

Принцип работы такой же, как и газовых детекторов, описанных ранее. Проходящие через детектор тепловые нейтроны, поглощаются тонким слоем кристаллического бор-10. В результате возникающей при этом ядерной реакции образуются «мягкое» γ -излучение (0,48 МэВ), ядра лития и α -частицы, Заряженные частицы реакции вылетают из точки захвата нейтрона под углом 180° друг к другу изотропно во всех направлениях.

Гамма-излучение, сопровождающее захват нейтронов бором, а также «фоновое» γ -излучение взаимодействует с материалом катода счетчика, выбивая из него вторичные электроны, которые тоже ионизируют газ. В этой конструкции, поскольку реакция происходит на поверхности, только одна из двух частиц попадет в пропорциональный счетчик. Общий вид подобного детектора показан на рисунке 5.



Рисунок 5 – Внешний вид детектора на основе бора в виде твердотельного конвертора

Основные минусы этого типа счетчиков — это низкая эффективность регистрации при использовании одного слоя покрытия. Для увеличения эффективности применяют различные варианты увеличения количества слоев бора. Самым популярным методом увеличения слоев является технология “Straw”. Схематическое изображение данной технологии показано на рисунке 6. “Straw” — это тонкостенный (каптон, медь, алюминий) пропорциональный счетчик, из таких счетчиков происходит набор одного большого счетчика [52].

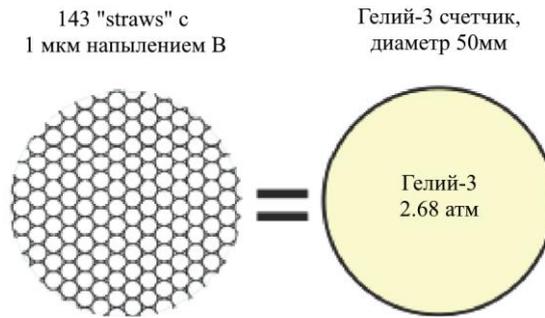


Рисунок 6 – Схематическое изображение технологии “Straw” [52]

Одним из основных минусов подобных детекторов является сложность изготовления, связанное с необходимостью создания массива детекторов, а также невозможностью достичь высокой эффективности при сохранении компактных размеров.

1.3.3 Сцинтилляционные детекторы нейтронов

Сцинтилляционные детекторы, являются одними из основных видов детекторов, без которых трудно представить какой-либо эксперимент с использованием нейтронов. С вводом в работу новых установок растет потребность в детекторах с улучшенными характеристиками в энергетическом, пространственно-временном разрешении, обладающих большой надежностью и простотой в эксплуатации, компактностью, возможностью высокой сегментации, невысокой стоимостью изготовления, долговременной стабильностью характеристик и радиационной стойкостью.

Сцинтилляционные счетчики во многом удовлетворяют этим требованиям. Хорошо разработанная современная технология производства сцинтилляторов позволяет изготавливать их в большом количестве и относительно дешево. Наиболее широкое применение нашли детекторы на основе $\text{ZnS}(\text{Ag}):^6\text{LiF}$.

Детекторы имеет более сложную структуру за счет того, что требуется транспортировать фотоны, исходящие из сцинтиллятора и регистрировать их детектором фотонов. В качестве световода для транспортировки фотонов используются спектросмещающие волокна (WLS) либо прозрачные пластики.

Также возможно размещение сцинтиллятора в прямой видимости от детектора фотонов, но такой способ не нашел применения в дифракционных детекторах.

WLSF изготовлены из пластикового материала, который имеет легирующий флуоресцентный краситель. Он может поглощать фотоны с более высокой энергией и излучать один или несколько фотонов с меньшей энергией. В данном процессе есть одна важная особенность: направления падающих и испускаемых фотонов не являются коррелированными, а флуоресцентное излучение может происходить изотропно под любым углом. Захват светового потока происходит благодаря полному внутреннему отражению. С помощью этого механизма, волокно может захватить только те фотоны, которые попадают в него под углом к оси волокна, который не превышает угол полного внутреннего отражения. С помощью волокон можно захватить и высветить около 5% падающего света. WLS состоят из чувствительной сердцевины волокна и оболочки волокна. Внутреннее отражение флуоресцентного света происходит на границе этих двух компонентов, когда угол падения (угол между падением фотона и нормалью к поверхности) больше критического угла [53]. Основными мировыми производителями WLS волокон являются корпорации Kuraray (Япония) и Vicon (США). Основная особенность использования WLS — низкое затухание фотонов в объёме волокна, что позволяет увеличить длину детектора.

Световод из прозрачного пластика, в отличие от WLS, не осуществляет конвертацию фотонов и служит только для транспортировки фотонов. Это позволяет при установке фотоприемника использовать различные линзы для концентрации фотонов. В то же время, за счет затухания в объёме, накладывает ограничение на максимальную длину детекторов.

Основная особенность детекторов подобного типа — это широкие возможности по варьированию размеров детектора и эффективности. Эффективность детектора можно увеличивать, изменяя количество слоев. Пример подобного детектора представлен на рисунке 7 [54].

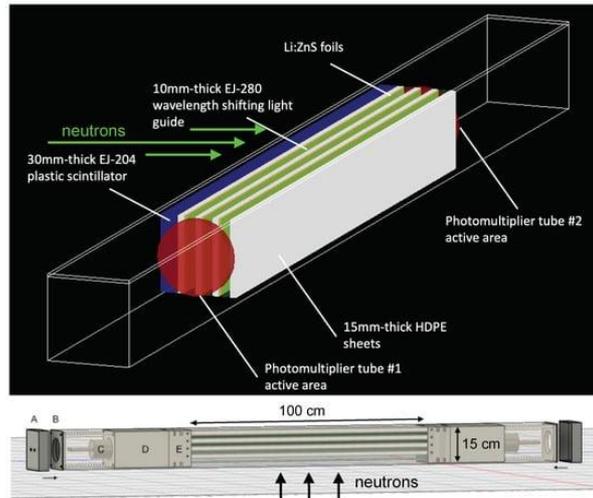


Рисунок 7 – Схема сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов

1.3.4 Выводы

Линейные детекторы тепловых нейтронов являются одними из основных типов детекторов, используемых в дифракционных установках. Связано это с высокой эффективностью, простой конструкцией и легкостью обслуживания. Простота обслуживания состоит в том, что в случае поломки одного из детектора, всегда можно его заменить, что не всегда возможно при использовании позиционно-чувствительных детекторов. Для дифракционных экспериментов из одиночных детекторов собирают массивы детекторной системы для захвата большего телесного угла. Например, на рисунке 8 представлен суперпозиционный дифрактометр “ДИСК”, состоящий из 224 сцинтилляционных детекторов.

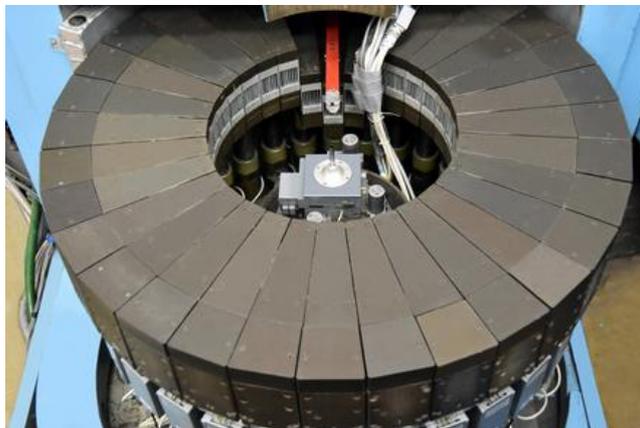


Рисунок 8 – Внешний вид детекторной системы дифрактометра ДИСК исследовательского реактора ИР-8 НИЦ “Курчатовский институт”

В случае, если требуется определение текстуры образца, возможно создавать вертикальный массив из одиночных детекторов. Пример такого детектора показан на рисунке 9.



Рисунок 9 – Тектурный дифрактометр “СКАТ” исследовательского реактора ИБР-2м ОИЯИ

Помимо дифракционных экспериментов, возможно использовать линейные детекторы для других типов нейтронных экспериментов. Например, на рисунке 10 представлен внешний вид детекторной системы рефлектометра SEQUOIA, состоящей множества детекторов, покрывающие углы по горизонтали от -30 до 60 градусов и вертикально +/- 18 градусов.

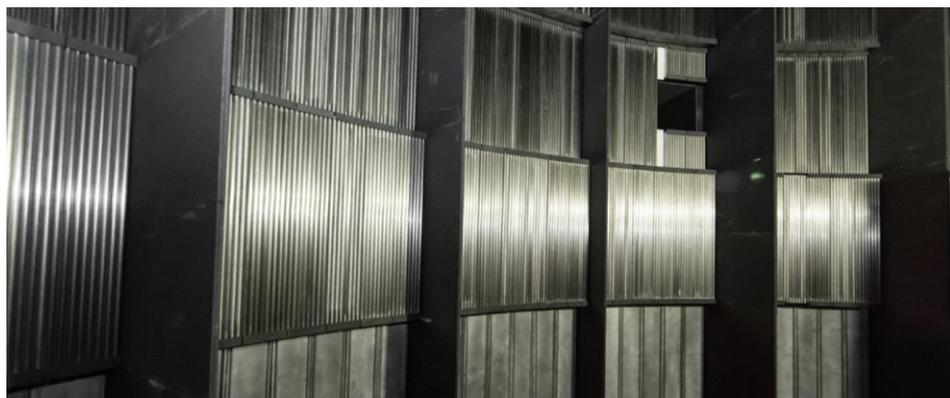


Рисунок 10 – Внешний вид детекторной системы установки SEQUOIA источника SNS ORNL, США

1.4. Позиционно-чувствительные детекторы тепловых нейтронов

В качестве линейного ПЧД детектора в дифракционных экспериментах достаточно часто используют цилиндрический пропорциональный счетчик (LPSD — Linear Position Sensitive Detector, линейный позиционно-чувствительный детектор), основанный на трубках, наполненных гелий-3. Внешне они не отличаются от описанных ранее газовых детекторов. Главное отличие – наличие анода с двух сторон. Анализируя амплитуду и время прихода сигнала, возможно восстановить координату события.

Они обладают пространственным разрешением 3.5 мм на длине 600 мм [55], но требуют высокого давления газа 10-30 бар. Одним из недостатков данного детектора является высокая текучесть гелия и требования к высокому напряжению (2000 В).

Развитием этих детекторов являются двухмерные ПЧД на основе стрипов и микрострипов [55]. Детектор состоит из массива анодов, расположенных в общем объёме, заполненных газом гелий-3. Определение координаты основано на анализе амплитуды и задержки сигналов. Данные детекторы позволяют получить разрешение около 1 мм. Принципиальная схема показана на рисунке 11.

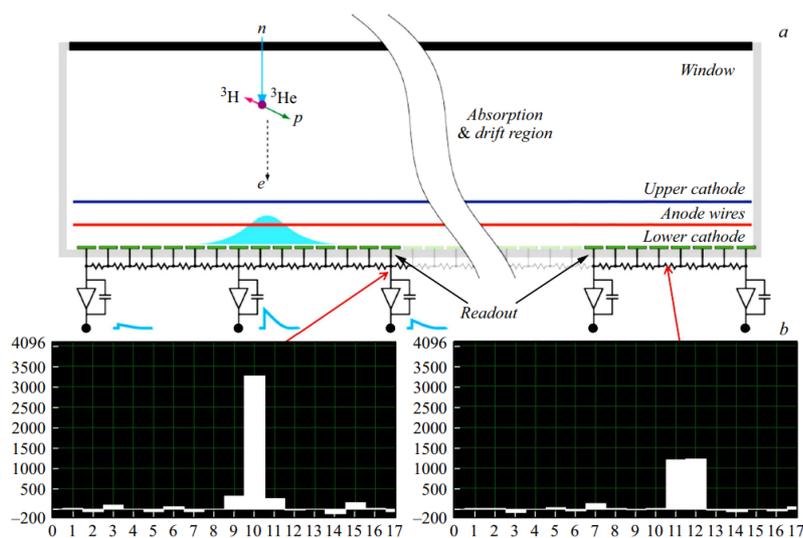


Рисунок 11 – Принципиальная схема построения стриповых детекторов

Существуют различные варианты подобных детекторов. Отличия заключаются в методе изготовления стрипов, но принцип работы у всех одинаковый. Основные недостатки – требуется высокий объём газа гелий-3, сложность с герметизацией. При этом этот тип детектора имеет максимальную эффективность регистрации тепловых нейтронов.

Развитием данных детекторов является использование покрытия на основе бор-10. Основное отличие — в качестве конвертера на одной стороне детектора нанесено микроструктурное покрытие на основе бора [42]. Микроструктурное покрытие необходимо для увеличения эффективности регистрации нейтронов. Недостатком данной конструкции является низкая эффективность регистрации (около 25%). Принципиальная схема детектора показана на рисунке 12.

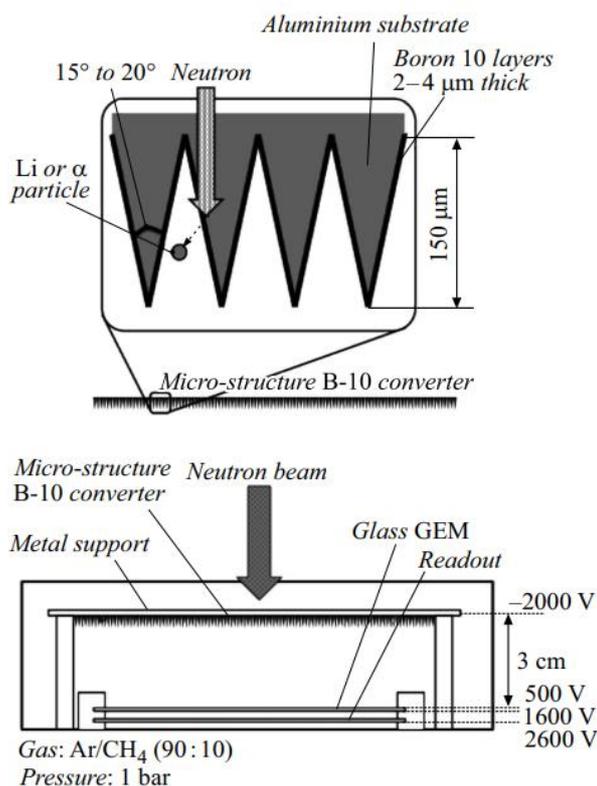


Рисунок 12 – Принципиальная схема построения ПЧД детекторов на основе бора [42]

Также существуют подобные детекторы на основе сцинтилляторов. Конструкция основана на изготовлении массива спектросмещающих волокон,

которые приклеены непосредственно к сцинтиллятору [56]. Координата в подобном типе детектора определяется как пересечение волокон, на которых зарегистрирован сигнал. Разрешение такого детектора зависит от размеров WLS волокон. Недостаток подобного типа детектора в том, что требуется большое количество регистрирующих каналов для независимой обработки сигналов с каждого волокна.

Эффективность детектора возможно увеличить, используя большее количество слоев, что в свою очередь увеличивает количество волокон, и требуемых регистрирующих каналов. На рисунке 13 представлен внешний вид подобного типа детектора.

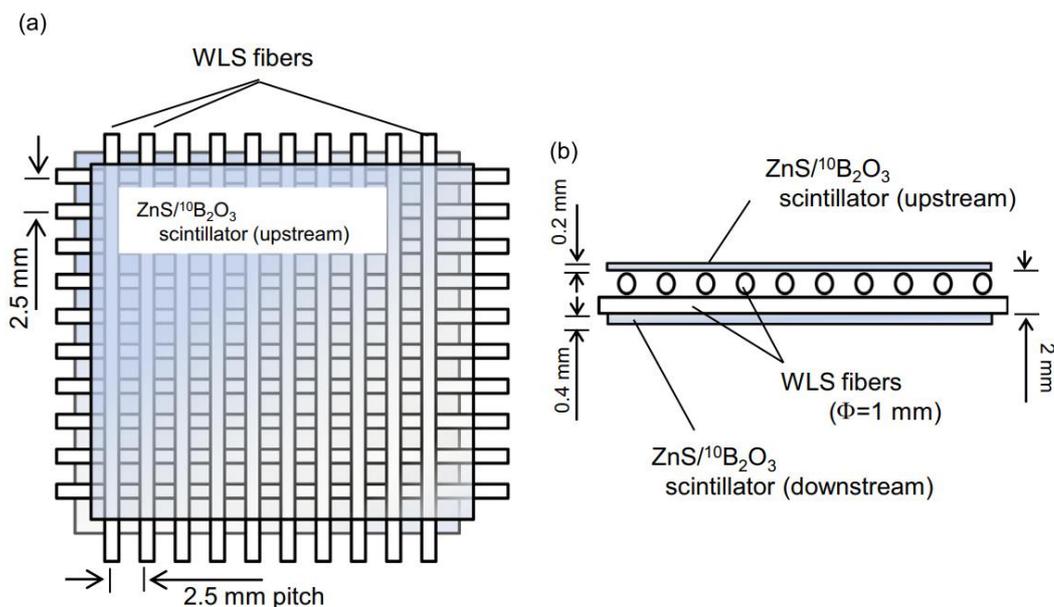


Рисунок 13 – Принципиальная схема построения ПЧД детекторов на основе сцинтиллятора [56]

Еще один вариант изготовления ПЧД детектора основан на регистрации нейтронов прозрачным сцинтиллятором (камера Ангера) и анализе амплитуд получаемых с множества фотоприемников, расположенных в оптическом контакте со световодом [57]. За счет прозрачности сцинтиллятора, фотоны, получаемые при захвате нейтрона, распространяются во всех направлениях, и методом

"взвешивания" сигналов с матрицы фотодетектора возможно восстановить координату события. На рисунке 14 представлен внешний вид детектора.

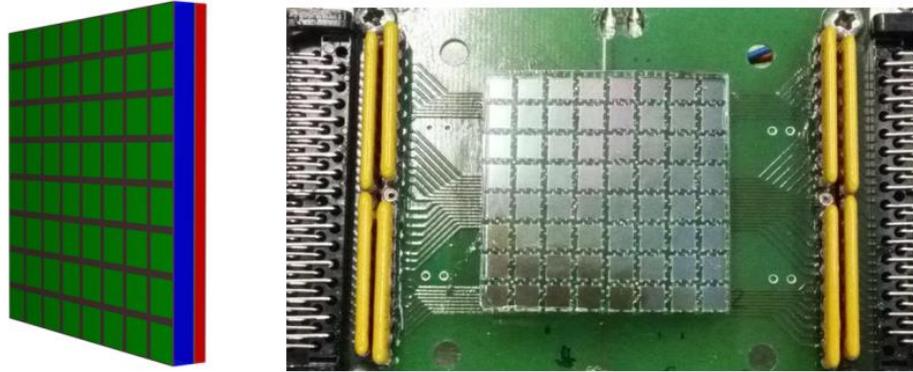


Рисунок 14 – Внешний вид ПЧД типа камера Ангера [57]

Одним из частных случаев камеры ангера является детектор, основанный на массиве кремниевых фотоумножителей (SiPM) [58], который клеится напрямую на непрозрачный сцинтиллятор. Определение координаты основано на определении SiPM который зарегистрировал фотоны. В подобных детекторах возможно достичь высокого пространственного разрешения (около 1x1 мм), но сложно добиться увеличения эффективности. Для прозрачного сцинтиллятора с увеличением толщины будет падать разрешение, а в случае использования непрозрачного сцинтиллятора, невозможно добавить дополнительный слой сцинтиллятора.

Также данные детекторы требуют большого количества регистрирующих каналов для независимой регистрации сигналов, получаемых с фотоприемников. На рисунке 15 представлен внешний вид подобного детектора.

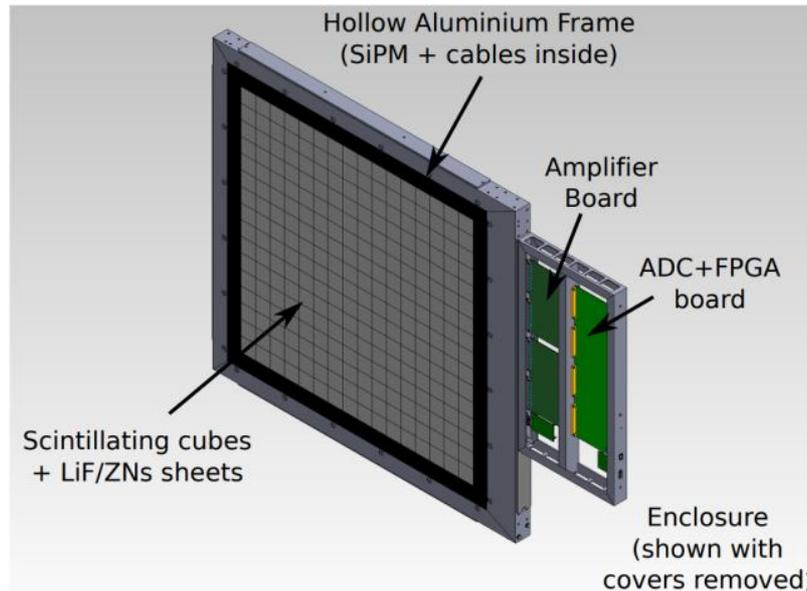


Рисунок 15 – Принципиальная схема построения ПЧД детекторов на основе массива SiPM [58]

Одним из вариантов замены подобного типа детектора, является детектор, основанный на сцинтилляторе и временном анализе распространения фотонов в органическом световоде [59]. В этом способе одновременно анализируются времена прихода сигналов с SiPM. Время распространения фотонов в объёме зависит от расстояния, которое проходят фотоны до SiPM. Разрешение определяется разницей времени регистрации фотонов, которое составляет около 16 пс на мм [59]. В данном методе для регистрации сигналов требуется намного меньше регистрирующих каналов, чем в других, так как используется всего два SiPM (для одномерного позиционно-чувствительного детектора), но при этом требуется точно определять разницу во времени прихода сигналов в диапазоне пикосекунд, что в свою очередь требует достаточно быстрого аналого-цифрового преобразователя для анализа сигналов.

Выводы

Позиционно-чувствительные детекторы не нашли широкого применения в дифракционных экспериментах. Достаточно широко нашли применение LPSD детекторы. Например, одним из вариантов использования LPSD детектора является дифракционная установка NOMAD, представленная на рисунке [60]. Детекторная

система состоит из множества LPSD и позволяет захватывать большой телесный угол.

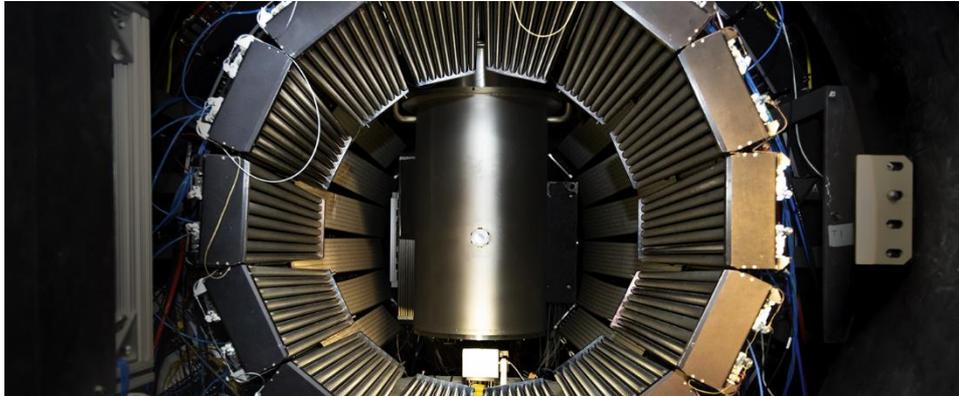


Рисунок 16 – Внешний вид детекторной системы установки NOMAD SNS, США

Также за счет низкой цены, высокой эффективности и возможности создания различных конфигураций, в настоящее время все активней используются сцинтилляционные ПЧД для дифракционных экспериментов. В свою очередь газовые ПЧД детекторы активно применяют как дополнительные детекторы для дифракционных установок. Например, в качестве мониторинговых детекторов.

ГЛАВА 2. Создание сцинтилляционного детектора нейтронов

Исторически сложилось, что сцинтилляционные детекторы нейтронов нашли широкое применение в области физики высоких энергий [61]. К ним предъявляются требования по большой чувствительной площади, и единственным вариантом съема фотонов с больших площадей сцинтиллятора является использование спектросмещающих волокон [61], либо размещения сцинтиллятора в прямой видимости от фотоприемника [62].

Для детекторов, используемых при дифракционных измерениях, предъявляются другие требования. Одно из требований - компактные размеры, которые необходимы для достижения высокого углового разрешения. Также от них требуется высокая загрузочная способность, так как плотность потока нейтронов на образце достигает $10^{15} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ и выше [9], а также высокая эффективность, которая позволяет уменьшить время проведения эксперимента. В частности, при большом размере детектора может возникнуть ситуация, когда из-за высокого потока нейтронов станет невозможно разделять события регистрации нейтронов близкие по времени.

В то же время, дифракция нейтронов на образце образует кольца Дебая-Шеррера, и, в идеальном случае, детекторы должны размещаться вертикально по радиусу кольца от образца. Это нужно для сохранения одинакового расстояния образец-детектор, которое влияет на разрешения дифракционной установки.

Таким образом детекторы для дифракции должны одновременно иметь небольшую ширину, чтобы можно было добиться высокого пространственного разрешения и одновременно с этим небольшую длину, чтобы исключить ухудшения разрешения и внесения ошибок за счет сильного различия расстояния образец-детектор.

При проектировании сцинтилляционных детекторов важно учитывать теорему Лиувилля о сохранении фазового объема. В случае оптических систем она отвечает на вопрос о том, сколько света будет потеряно на согласовании размеров фотоприёмника и световода [63]. Если поверхность фотодетектора меньше,

количество света, попадающего на фотодетектор, уменьшается в соотношении этих поверхностей. Из-за этого эффективность сбора света может быть очень низкой, если небольшой фотодетектор считывает большой лист сцинтилляционного материала [64].

В дифракционных экспериментах типичный диапазон размеров детекторов - ширина 3-10 мм, длина 50-150 мм. В данном случае использование WLS для сбора света приводит только к усложнению конструкции детектора — так, как ширина детектора соответствует размерам SiPM, а количество фотонов достигаемых торцов световода, на длине световода до 200 мм достаточно, чтобы достоверно зарегистрировать событие. Так же, что немаловажно, квантовая эффективность приемника зависит от длины волны. Для большинства SiPM максимальная квантовая эффективность (PDE) достигается для фотонов ~450 нм. Например, для SiPM SensL и NDL PDE (для 450 нм) равна 40%, а при длине ~500 нм (что соответствует длине переизлучения WLS) составляет 30% (рисунок 17). Таким образом за счет отсутствия сдвига длины волны, компактные детекторы на основе прозрачного световода и кремниевого фотоумножителя имеют большую эффективность регистрации фотонов.

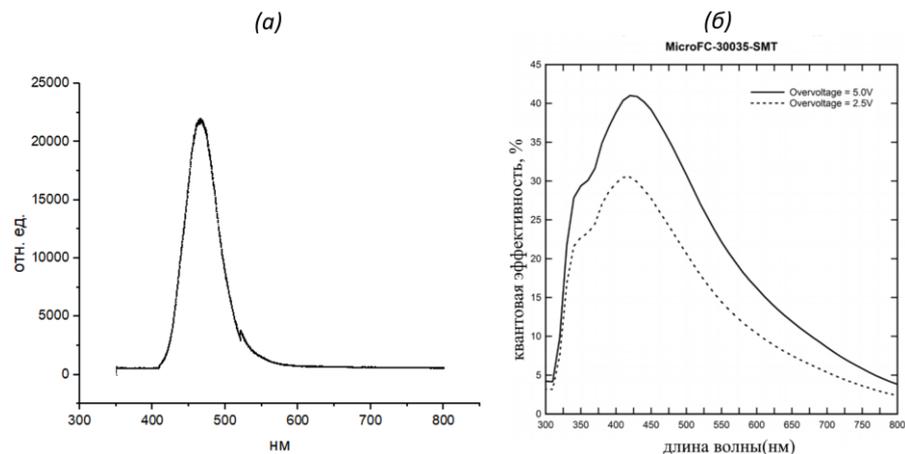


Рисунок 17 – (а)- Спектр сцинтиллятора ZnS (Ag):⁶LiF при возбуждении синим лазером (405 нм), ИЯИ РАН - оптическая лаборатория,
(б) - Квантовая эффективность в зависимости от перенапряжения и длины

ВОЛНЫ

Еще одним недостатком использования ФЭУ вместо SiPM в детекторах при исследованиях с использованием нейтронов — это чувствительность к магнитному полю [65]. При исследованиях с помощью нейтронов достаточно часто используются различные устройства, создающие сильное магнитное поле, например спин-флипперы [66] и устройства создания магнитного поля на образце [67]. В свою очередь SiPM не чувствительны к магнитному полю [68], что определяет их использование в магнитных полях.

Таким образом, в нейтронных детекторах для дифракционных измерений отказ от световода на основе WLS позволит, во-первых, увеличить количество фотонов, достигающих торцов световода, а также, увеличить эффективность регистрации фотонов за счет отсутствия переизлучения. Одновременно с этим за счет близких размеров контактного пятна световода и SiPM можно согласовать размеры и исключить потери света при согласовании размеров световода и фотоприемника. За счет большего количества фотонов становится возможно увеличить эффективность регистрации, используя сцинтиллятор большой толщины, на котором меньше световых выходов [69]. Что немаловажно, отсутствие WLS и крепление SiPM на световоде позволит упростить конструкцию и уменьшить габариты детектора.

На первой стадии исследования стояла задача оценить возможность создания детекторов нейтронов на основе SiPM и пластикового прозрачного световода.

2.1 Одиночные детекторы нейтронов

Основные мотивации при разработке детекторов нового типа:

- Дефицит изотопа гелия и трудность покупки гелиевых счетчиков, в связи с этим дефицитом.

- Утечка гелия из уже имеющихся детекторов.

- Высокая цена гелиевых детекторов.

- Отказ от применения высоковольтных источников для работы детекторов.

Вначале было проведено моделирование оптических параметров.

2.1.1 Моделирование оптических параметров и создание прототипа

Для оценки параметров пропускания света и количества фотонов, падающих на кремниевый фотоумножитель, было проведено моделирование в программе оптического моделирования TrancePro.

Первый этап работы с TrancePro — синтез геометрической модели оптической системы собственными средствами программы или импорт файлов в форматах SAT, IGES или STEP. Вид модели разработанного детектора показан на рисунке 18. В модели смоделирован световод геометрическими размерами 5x5x60 мм, на котором расположен сцинтиллятор толщиной 0.45 мм, длиной 50 мм и шириной 5 мм.

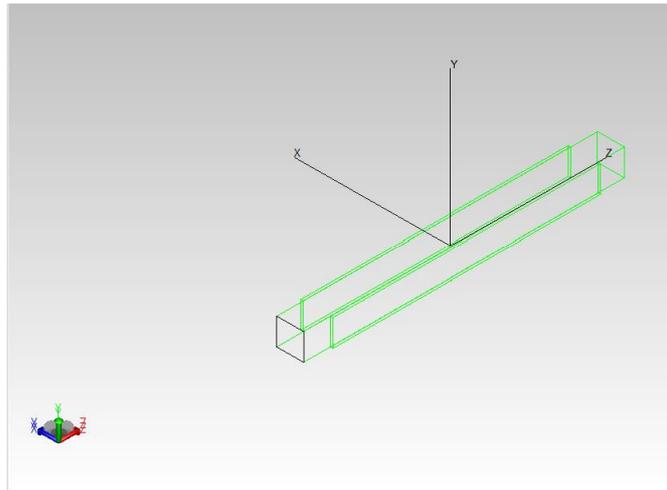


Рисунок 18 – Схема модельного световода

На втором шаге требуется определение источников света на сетке лучей или придание поверхностям свойств источников. В нашем случае в качестве источника света использовалась сфера размером 0.0001 мм расположенная на поверхности сцинтиллятора. Мощность в ваттах определялась как,

$$n = \frac{E}{E_f} = \frac{P * t * \lambda}{h * c}, \quad (4)$$

, где n – количество фотонов, t – время, h – постоянная планка, c – скорость света, P – мощность, λ – длина волны, E – общая энергия, E_f – Энергия одного фотона.

Параметры, используемые при моделировании: $t=1$ сек, $\lambda = 460$ нм, количество фотонов — $1.6 \cdot 10^5$. Мощность источника составила $6.9 \cdot 10^{-12}$ Вт. Количество лучей для расчета приняли равным 10 000.

Далее происходит ввод параметров оптических свойств материала детектора. Для сцинтиллятора был выбран ZnS, для световода — полиметилметакрилат (РММА или оргстекло). Для упрощения моделирования принято допущение, что все фотоны, падающие на торцы световода, полностью поглощаются кремниевым фотоумножителем и событие поглощения нейтрона происходит на поверхности сцинтиллятора вблизи световода. Остальные поверхности выбраны как диффузный белый отражатель, что в реальном детекторе реализуется в виде покрытия его белой фторопластовой лентой.

Результаты моделирования показаны на рисунке 19, а. Как видно из результатов моделирования, количество фотонов с обоих торцов почти одинаково и равно $4,5 \cdot 10^4$. Дополнительно было произведено моделирование детектора размером 120 мм (рисунок 19, б). Количество фотонов при этом равнялось $1.82 \cdot 10^4$, что соответствует примерно 65% от исходного количества фотонов.

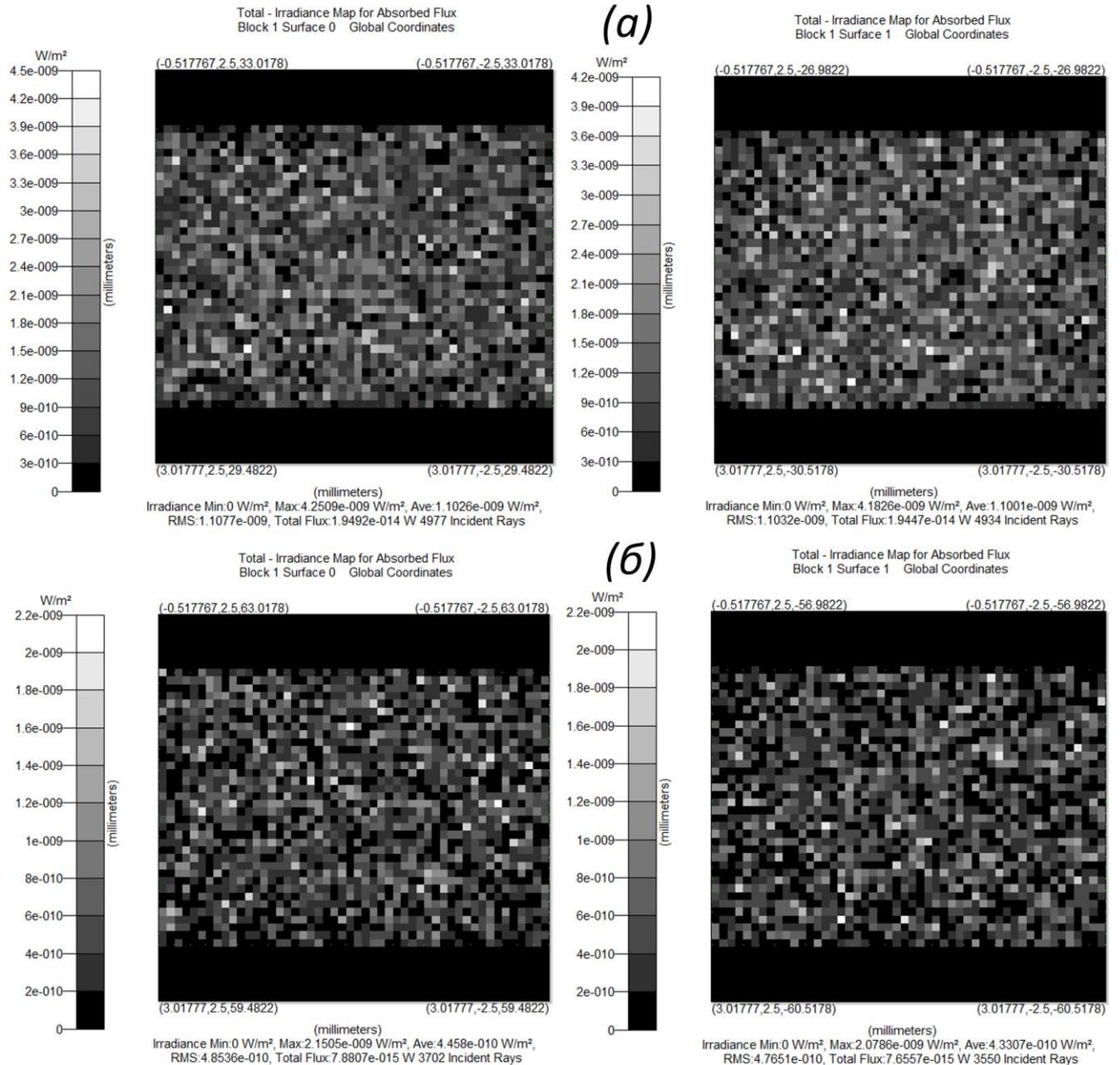


Рисунок 19 – Результаты моделирования световода, (а) - длиной 60 мм, (б) - длиной 120 мм

По результатам моделирования видно, что для таких размеров детектора все еще достаточно фотонов, чтобы достоверно зарегистрировать вспышку от регистрации фотонов. Дополнительно было проведено моделирование детектора размером 250 мм. На такой длине до кремниевого фотоумножителя доходит $25 \cdot 10^2$ фотонов, или примерно 22% от исходного количества фотонов. Это позволяет все

еще достоверно регистрировать фотоны. Эти результаты показывают, что из-за затухания в объёме и многократного отражения прозрачный световод накладывает ограничение на длину детектора. На этой длине светосбор с помощью органического световода становится близким с методом сбора света с помощью WLS (эффективность 5–20% [53]) и не имеет смысла создавать детекторы с органическим световодом большей длины, т. к. потери не позволят регистрировать фотоны.

Создание прототипа

В качестве исходных материалов для создания тестового детектора была выбрана комбинация, состоящая из сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag}):^6\text{LiF}$ - световода из органического стекла (Plexiglas). Сбор света осуществлялся SiPM фирмы KETEK.

Сцинтиллятор в настоящее время производится Saint-Global (Франция), ELJEN TECHNOLOGY (USA), Rc Tritec (Швейцария). Он представляет пластину из прессованных гранул определенного размера $\text{ZnS}(\text{Ag})$ и LiF в определенной пропорции. Пропорция сцинтиллятора определяет эффективность регистрации нейтронов, а размеры гранул - разрешение, которое важно при использовании пластин в детекторах для томографии и радиографии. В тестовой версии детектора использовался сцинтиллятор с эффективностью 28% и толщиной 0.45 мм.

При работе со сцинтиллятором необходимо проявлять осторожность т. к. он является достаточно хрупким, и резать его возможно методом скрайбирования, либо, что предпочтительней, лазером.

Оргстекло было выбрано в качестве световода из-за высокой прозрачности (92%). Также оно достаточно легко обрабатывается и с ним становится возможно использовать различные приемы сбора света из оптики, например создание линз для концентрации фотонов на SiPM.

Использование SiPM позволило отказаться от использования высокого питающего напряжения т. к. типичное напряжения питания SiPM около 33В. В настоящее время происходит активное развитие этой технологии. Стали доступны SiPM различных размеров: от 1x1 мм до 6x6 мм. Квантовая эффективность

современных SiPM доходит до 45%. Основной минус — это достаточно высокий тепловой шум (рисунок 20), но с помощью различных особенностей электроники, можно избавиться от него.

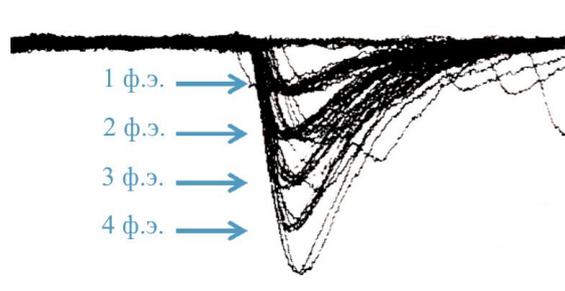


Рисунок 20 – Типичная оциллограмма с SiPM в зависимости от количества фотоэлектронов

Таким образом, использование подобных компонентов, позволяет предположить, что такая комбинация окажется выигрышной и получится создать детектор с высокими параметрами световых выходов, невысокой ценой и высокой эффективностью.

В качестве тестового образца был создан детектор, изображенный на рисунке 21. Сцинтиллятор размером 100x15мм, толщиной 0.45 мм, эффективностью 28% клался сверху полированного световода размером 120x15мм, толщиной 6 мм, с двух краев световода приклеивались SiPM фирмы KETEK 6x6 мм. Все это обтягивалось непрозрачной термоусадочной пленкой для предотвращения попадания фотонов извне [12].

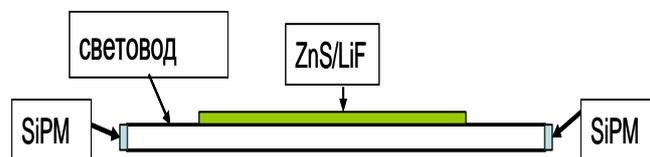


Рисунок 21 – Схема тестового детектора

Для измерения параметров полученного детектора использовалась следующая схема (рисунок 22). Принцип работы: фотоны из $\text{ZnS(Ag)}/^6\text{LiF}$ попадают в световод и транспортируются к SiPM, где происходит преобразование

светового сигнала в электрический. Сигналы с SiPM поступают в зарядочувствительные усилители и разветвляются. Часть сигнала поступает в зарядочувствительный АЦП (Leroy 2248A), а другая часть поступает на вход дискриминатора с порогом 30 mV (около 6 фотоэлектронов). Схема совпадений генерирует строб 250 нс, в течение которого происходит частичное интегрирование аналогового сигнала в АЦП.

Схема совпадения требовалась для устранения теплового шума детектора. В полученной схеме полностью отсутствовало влияние теплового шума SiPM [14].

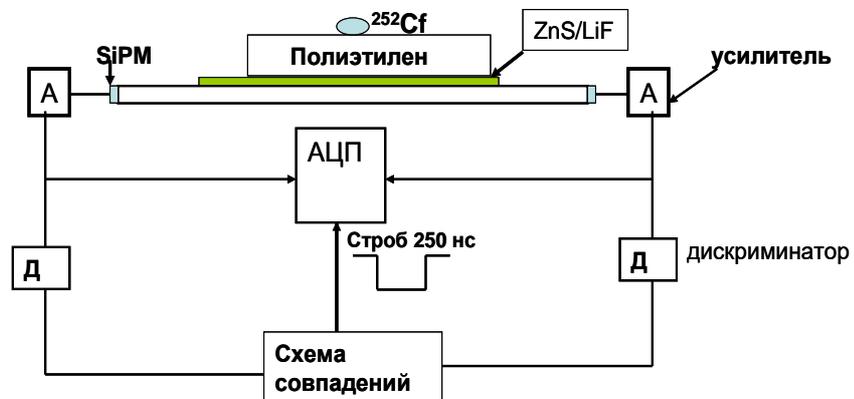


Рисунок 22 – Схема тестирования детектора

Измерения энерговыделения от события регистрации нейтрона происходило при расположении в непосредственной близости от сцинтиллятора источника ^{252}Cf и замедлителя непосредственно на сцинтилляторе (Полиэтилен 70 мм). На рисунке 23 показан результат измерений амплитуды сигнала с одного из фотодиодов.

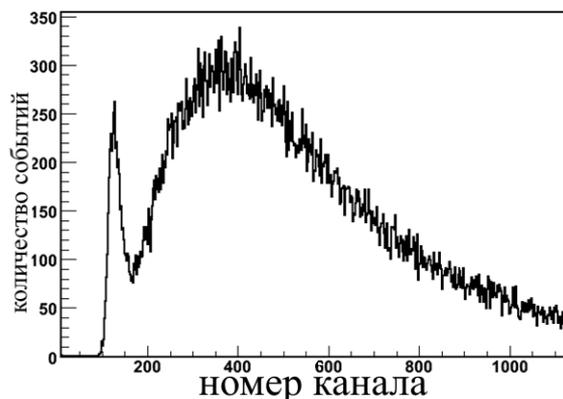


Рисунок 23 – Результаты измерений амплитуды сигнала с одного из SiPM

Левый пик представляет случайные совпадения шумов двух SiPM с амплитудой больше 6 фотоэлектронов. Правый пик соответствует сигналу от захвата нейтронов на уровне 20 фотоэлектронов [12].

Для достоверного подтверждения, что зарегистрировался именно нейтрон, был положен лист кадмия толщиной 1 мм непосредственно перед замедлителем. На рисунке 24 показан спектр SiPM при помещении листа кадмия. Это показывает, что интенсивность нейтронов подавлена на порядок и ранее был зарегистрирован именно сигнал от нейтронов.

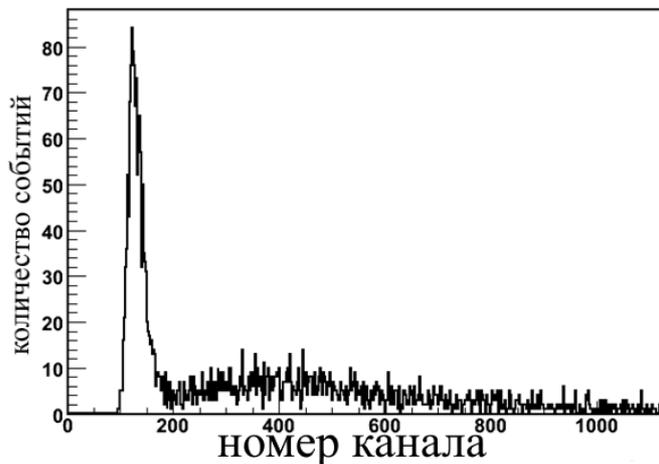


Рисунок 24 – Результаты измерений амплитуды сигнала с одного из SiPM с листом кадмия

Таким образом создан прототип детектора нейтронов с новой схемой регистрации фотонов со сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag})/{}^6\text{LiF}$. Данный подход принципиально отличается от других вариантов регистрации сигнала и позволяет получить высокий световыход и обеспечить эффективность регистрации нейтронов, близкую к эффективности сцинтиллятора

В описанном варианте высокая эффективность регистрации достигается благодаря захвату и транспортировке начальных сцинтилляционных фотонов оптическим световодом. Конструкция прототипа является масштабируемой по

размерам и позволяет создавать детекторы с активной областью, сравнимой с гелиевыми счетчиками.

2.1.2 Оптимизация параметров

После успешных первых испытаний детектора, показавших принципиальную возможность создания такого типа детектора, была проделана работа по оптимизации параметров как самих детекторов, так и электроники управления детектором.

В первую очередь была предпринята работа по созданию детекторов следующих параметров.

1. Активная площадь детектора 10x100 мм.
2. Конвертер нейтронов – сцинтиллятор ZnS (Ag)/⁶LiF с концентрацией литий-6, обеспечивающей максимальную эффективность регистрации нейтронов.
3. Транспортировка фотонов – оптическим световодом из оргстекла с оптимальной геометрией.
4. Регистрация фотонов – двумя SiPM с активной площадью 3x3 мм², размещенными на торцах оптического световода.
5. Усиление сигнала – зарядно-чувствительными усилителями со временем интегрирования 0.5 мкс.
6. Эффективность регистрации тепловых нейтронов – не хуже 45%.
7. Максимальная интегральная нагрузка – не ниже 10⁵ Гц.
8. Временное разрешение – не хуже 0.5 мкс.

Размер активной области 10x100 мм был выбран из соображений замены существующих гелиевых детекторов нейтронов на установках, расположенных на источниках ИЯИ РАН [70, 71]. Эффективность регистрации была рассчитана из текущих доступных к покупке сцинтилляторов.

В таблице 1 показаны доступные сцинтилляторы и их теоретическая эффективность.

Таблица 1.

Соотношение Люминофор: LiF (по весу)	⁶ Li изотоп, расчетная атомная объемная плотность	Толщина сцинтиллятора	Расчетная эффективность захвата тепловых нейтронов
Соотношение	Атомов/см ³	мм	%
2:1	12.90x10 ²¹	0.250	26
2:1	12.90x10 ²¹	0.450	42
4:1	7.7x10 ²²	0.250	17
4:1	7.7x10 ²²	0.450	28
2:1 плотный (ламинирование 4-х)	18.40x10 ²²	0.900	79
2:1 плотный (5-х ламинирование)	18.40x10 ²²	1.125	86

Первый шаг к увеличению эффективности регистрации нейтронов — это расположение второго слоя сцинтиллятора с другой стороны световода. Принципиальная схема показана на рисунке 25.

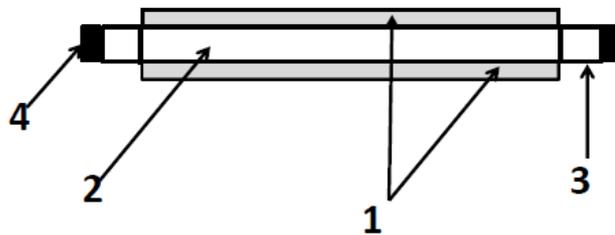


Рисунок 25 – Принципиальная схема нового детектора, 1 – сцинтиллятор, 2- световод, 3 – фокусирующая линза, 4- SiPM

Таким образом добавление второго слоя сцинтиллятора позволяет увеличить эффективность регистрации нейтрона примерно в 1.5 раза. Применение оптической смазки или оптического клея с коэффициентом преломления $K = 1.6$ позволяет заменить воздух ($K = 1$) между световодом из оргстекла ($K = 1.5$) и сцинтиллятором ($K = 2.4$) и позволяет улучшить переход света от сцинтиллятора в световод. Обратный переход света из световода ($K = 1.5$) в сцинтиллятор ($K=2.4$) затруднен, и свет распространяется вдоль по световоду в обе стороны. Сцинтиллятор в этом случае выполняет функцию диффузного отражателя.

Улучшение параметров сбора света на торцах обеспечивала призма в виде усеченной пирамиды. В качестве образцов были созданы несколько вариантов детектора. На рисунке 26 показан внешний вид детектора.

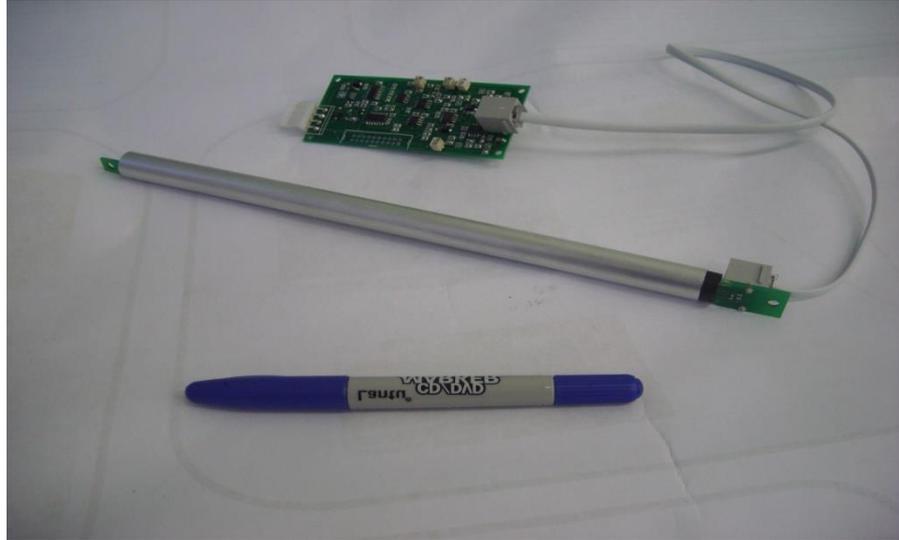


Рисунок 26 – Внешний вид детектора

Детектор был помещен в тонкостенную алюминиевую трубку для защиты и экранирования внешнего света.

В дальнейшем для упрощения конструкции оптической части была использована технология “Рыбий глаз”. Принципиальная схема показана на рисунке 27.

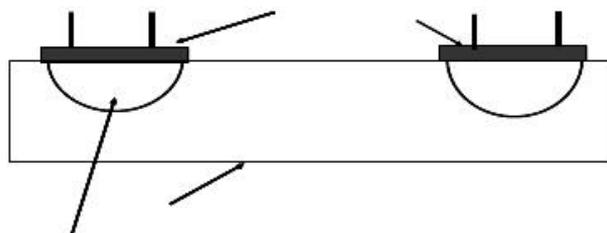


Рисунок 27 – Принцип использования линзы “рыбий глаз”

Применение технологии «рыбий глаз» (использование разновидности сверхширокоугольного объектива с целенаправленно увеличенной дисторсией) при работе с плоским световодом позволило создавать бесшовные детекторы

больших размеров [22], при этом она собирает примерно на 15% меньше света, в отличие от светосбора в торцах, что показано на рисунке 28.

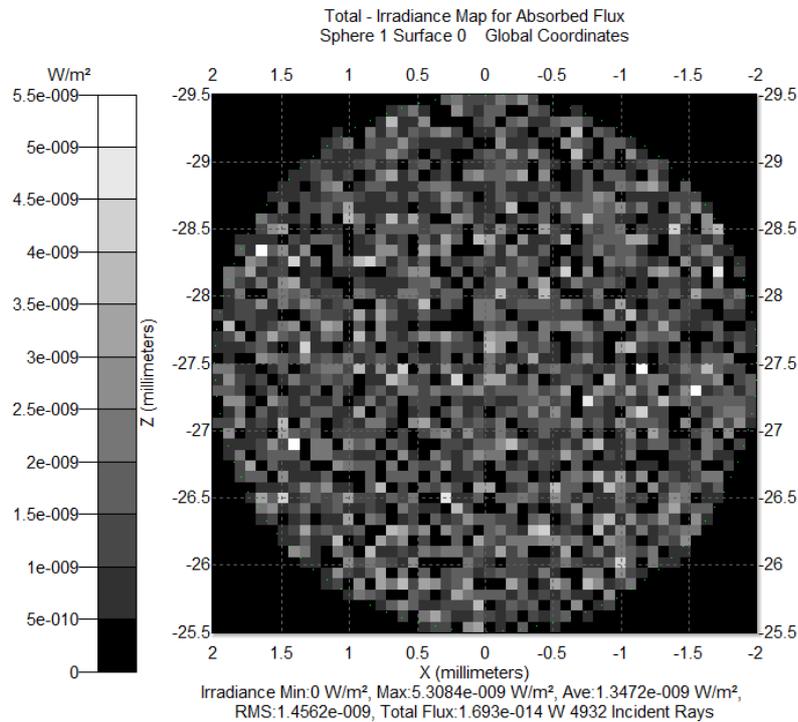


Рисунок 28 – Моделирование детектора размером 5x60 с линзами рыбьих глаз.

С использованием всех разработок были созданы различные версии детектора с эффективностью от 28% до 70%. На рисунке 29 показаны различные варианты детекторов. Минимальный размер детектора, созданный по этой технологии - 5x50 мм, с эффективностью около 70%. Увеличивая количество слоев возможно изготовление детекторов большей. При использовании 5 слоев можно достичь эффективности 90% [15].

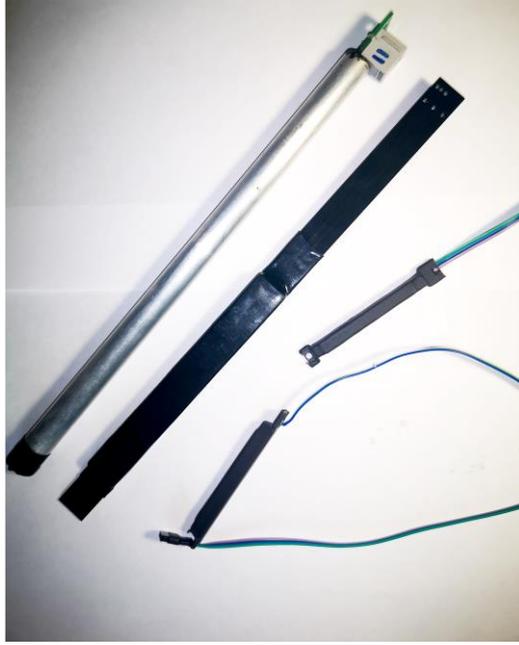


Рисунок 29 – Внешний вид различных вариантов детектора нейтронов

В процессе оптимизации оптических параметров детекторов была разработана и зарегистрирована полезная модель Кольцевой детектор тепловых нейтронов [22].

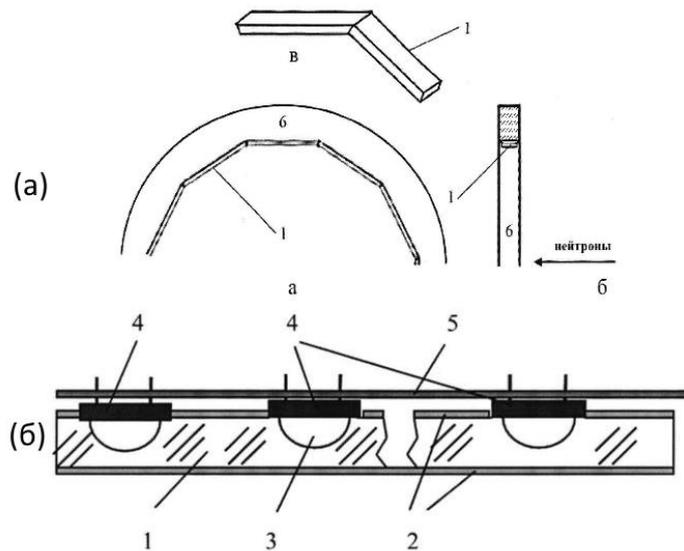


Рисунок 30 – Эскиз пояснения полезной модели, а – общий вид, б – пример детектора

Задачей полезной модели является расширение функциональных возможностей детекторов нейтронов за счет увеличения числа детекторов, улучшения светосбора от сцинтиллятора и повышения эффективности регистрации за счет исключения мертвых зон в кольцевом детекторе, увеличения активной площади и возможности масштабирования детектора по размерам, возможности съема позиционно-чувствительной информации с большой площади.

Техническим результатом, позволяющим решить указанную задачу, является увеличение эффективности регистрации за счет увеличения числа фотодетекторов, размещения их вдоль кольцевого световода и исключения мертвых зон в кольцевом детекторе.

Результат достигается использованием линзы и пластикового световода. Детектор выполнен в виде кольца из борсодержащего материала и содержит несколько плоских оптических световодов, выполненных в виде пластин трапецеидальной формы и размещенных в виде кольца на поверхности детектора с оптическим контактом друг с другом торцевыми гранями. При этом количество и размеры световодов достаточны для образования замкнутого кольца. В качестве борсодержащего материала может быть использован борированный полиэтилен, а оптические световоды могут быть выполнены трапецеидальной формы в продольном или в горизонтальном сечении.

Сущность полезной модели поясняется чертежами на рисунке 30, где 1 - плоский оптический световод, 2 - сцинтилляционные экраны ZnS (Ag)/LiF, 3 - светособирающие элементы, 4 - фотодетекторы, 5 – кроссплата.

Таким образом из одиночных детекторов становится возможно создавать детекторы любой конфигурации и формы, главной особенностью которых будет полное отсутствие мертвых зон.

Также в процессе оптимизации параметров детекторов разработан патент на Сцинтилляционный детектор нейтронного и гамма-излучения [25].

На рисунке 31 показана принципиальная схема детектора. Разработанный детектор работает в полях нейтронного и гамма-излучения следующим образом. В объём сцинтилляционного блока 1 попадает нейтронное либо гамма-излучение. Под действием нейтронов, попадающих в объём нейтронно-чувствительного сцинтиллятора 3, в нем возникают световые вспышки (или вспышки фотонов) с длиной волны излучения 450 нм с длительностью до 200-300 нс. Эти световые вспышки, из слоя (или слоев) нейтронно-чувствительного сцинтиллятора 3 переходят в соседний слой (или соседние слои) прозрачного гамма-чувствительного сцинтиллятора 4, где за счет его прозрачности и отражения от светоотражающего слоя из фторопласта световода 2 практически без потерь попадают через оптический контакт в собирающую линзу 5 и далее в кремниевый фотоумножитель 6, создавая на его выходе электрические импульсы длительностью 2-3 нс.

Нейтронно-чувствительный сцинтиллятор 3 на основе ZnS с добавлением изотопов для конвертации нейтронов (${}^6\text{Li}$ или ${}^{10}\text{B}$), которые делают его практически непрозрачным для собственного излучения и тем самым ограничивают его толщину примерно до 0.5 мм, обладает высокой эффективностью регистрации как тепловых (до 38 %), так и быстрых нейтронов при малых толщинах сцинтиллятора, что повышает эффективность регистрации и снижает габариты детектора.

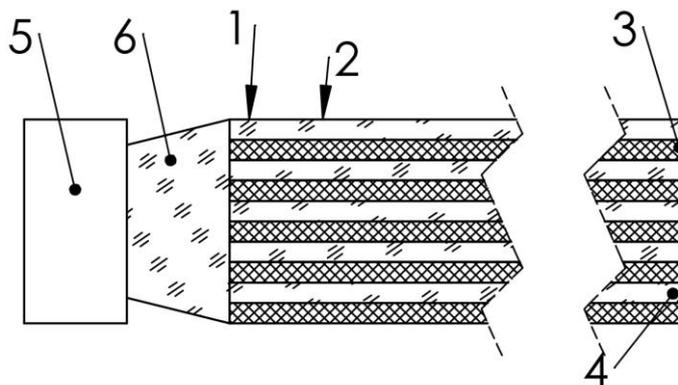


Рисунок 31 – Эскиз пояснения патента

В объеме прозрачного гамма-чувствительного сцинтиллятора 4, выполненного из водородсодержащего вещества на основе пластмассы (в частности, из поливинилтолуола), происходит замедление быстрых нейтронов и перенос фотонов через прозрачный гамма-чувствительный сцинтиллятор 4 и собирающую линзу 6 на кремниевый фотоумножитель 5.

Собирающая линза 6 при этом служит для концентрации фотонов на чувствительном объеме кремниевого фотоумножителя 5 и позволяет согласовать размеры световода 2 с размером активной области кремниевого фотоумножителя 5, тем самым уменьшая потери фотонов от переотражения от стенок световода 2, повышая эффективность регистрации.

Аналогичным образом происходит регистрация гамма-излучения, только конвертация излучения в фотоны происходит сразу в прозрачном гамма-чувствительном сцинтилляторе 4. Гамма-кванты вызывают в слое гамма-чувствительного сцинтиллятора 4 световые вспышки длительностью $\tau=1-50$ нс. Эти световые вспышки попадают через оптический контакт в собирающую линзу 5 и далее в кремниевый фотоумножитель 5, создавая на его выходе электрические импульсы различной длительности. За счет различной длительности вспышки фотонов от нейтронного и гамма-излучения, становится возможно определить тип излучения. Таким образом, на основе патента возможно создавать компактные и дешевые детекторы нейтронного и гамма-излучения, которые могут найти применение в устройствах для персональной дозиметрии.

2.1.3 Управляющая электроника

Кремниевый фотоумножитель выдает относительно слабый сигнал, и для работы с ним его требуется предварительно усилить. Существуют различные схемы включения (рисунок 32) для установки требуемого рабочего режима SiPM и согласования его со считывающей электроникой. Обычно главной задачей при разработке схемы включения является обеспечение стабильности коэффициента усиления SiPM при изменении напряжения питания и температуры, а также

высокого отношения сигнал/шум. Хотя для ряда применений особое внимание уделяется достижению максимального быстродействия [72].

Полярность напряжения смещения SiPM (напряжения, падающего на фотоприемнике) определяется типом проводимости подложки. Источник питания подключается к SiPM со стороны гасящих резисторов через интегрирующую RC-цепь, используемую для защиты источника и подавления импульсных помех. Другой электрод SiPM соединяется через нагрузочный резистор R_L (с сопротивлением в диапазоне от 1 до 20 кОм) с шиной нулевого потенциала или с регулируемым источником напряжения (цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) на рисунке 32, в), применяемым для точной подстройки коэффициента усиления. Чаще всего считывание сигнала SiPM осуществляется с помощью трансрезистивного усилителя (ТРУ) или зарядо-чувствительного усилителя (ЗЧУ) [72].

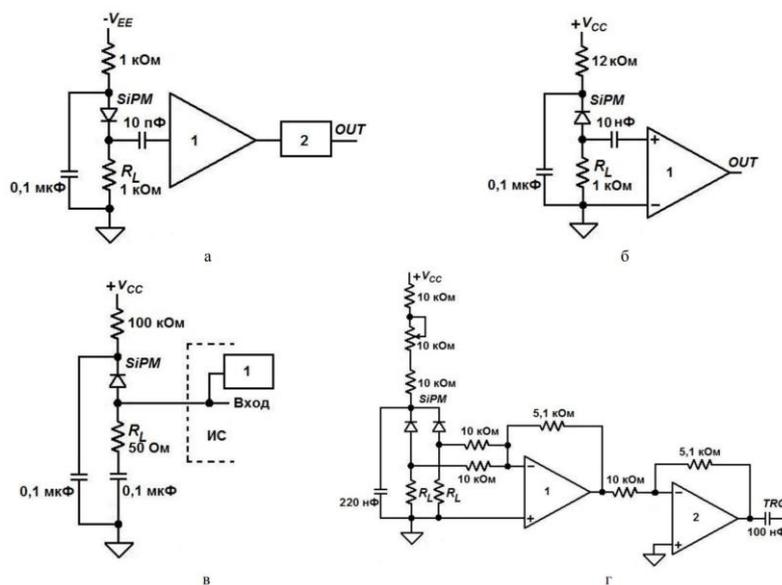


Рисунок 32 – Типовые схемы включения SiPM [72]

- а) 1- Трансрезистивный усилитель с 50-омным входным сопротивлением типа VT120; 2 Усилитель -дискриминатор 9327 фирмы Ortec
- б) 1- трансрезистивный усилитель с 50-омным входным сопротивлением
- в) 1–8-разрядный ЦАП
- г) 1,2 двухкаскадный усилитель на базе ОУ

Иногда применяется быстродействующий усилитель в режиме сумматора (рисунок 32, г) для выработки синхронизирующего импульса (узел TRG) по сумме сигналов всех каналов. Обычно SiPM соединен со схемой считывания по переменному сигналу через разделительный конденсатор, не превышающий десятков нанофард (рисунки 32 а, б); на рисунке 32, в разделительный конденсатор расположен внутри интегральной схемы (ИС)), так как низкочастотная составляющая входного сигнала не содержит полезной информации [72].

В нашем случае при разработке электроники за основу была взята схема на основе зарядо-чувствительного усилителя (ЗЧУ) [14]. Блок-схема электроники представлена на рисунке 33.

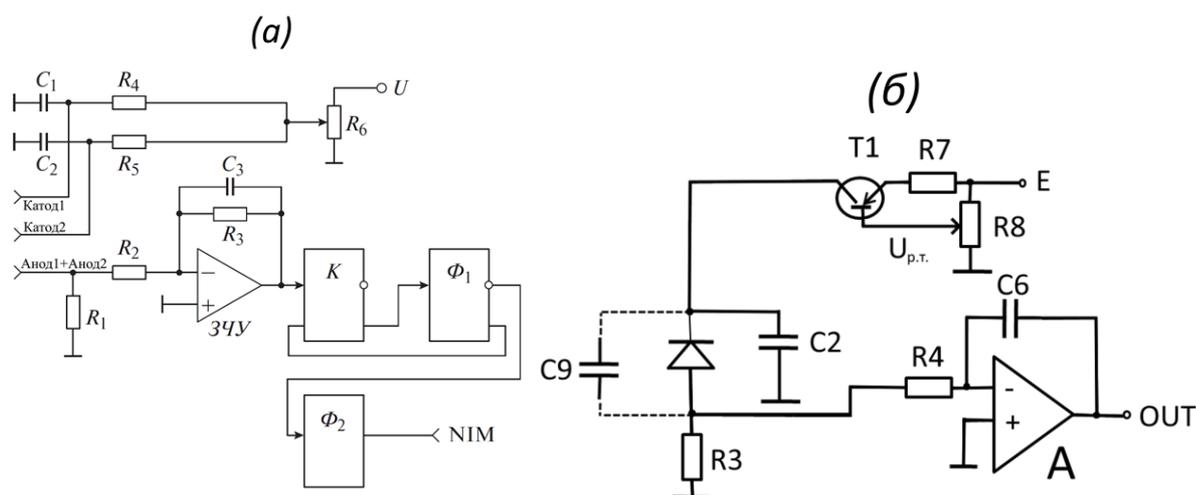


Рисунок 33 - (а) Схема усилителя-формирователя; ЗЧУ- зарядо-чувствительный усилитель; К – Компаратор; Ф – формирователь, (б) Новый вариант смещения кремниевого фотоумножителя

Сигналы с анодов SiPM суммируются и подаются на ЗЧУ (Рисунок 33, а). Время интегрирования выбрано от 0.5 мкс (первые версии) до 2 мкс, что оптимально для регистрации медленной компоненты светового импульса от сцинтиллятора ZnS (Ag)/LiF. При превышении сигналом порогового значения срабатывает компаратор К и запускает формирователь Ф1, который вырабатывает импульс длительностью 0.5 мкс, блокирующий на это время компаратор. По спаду

импульса запускается формирователь Ф2, который генерирует выходной импульс длительностью 150 нс в стандарте NIM. Напряжение смещения на лавинных фотодиодах регулируется сопротивлением R6 [14]. Фото различных версий предусилителя усилителя представлено на рисунке 34. Для питания требуется напряжение $\pm 6\text{В}$, и $+33\text{В}$ для питания SiPM, формат выходного сигнала - аналоговый и цифровой формата NIM.

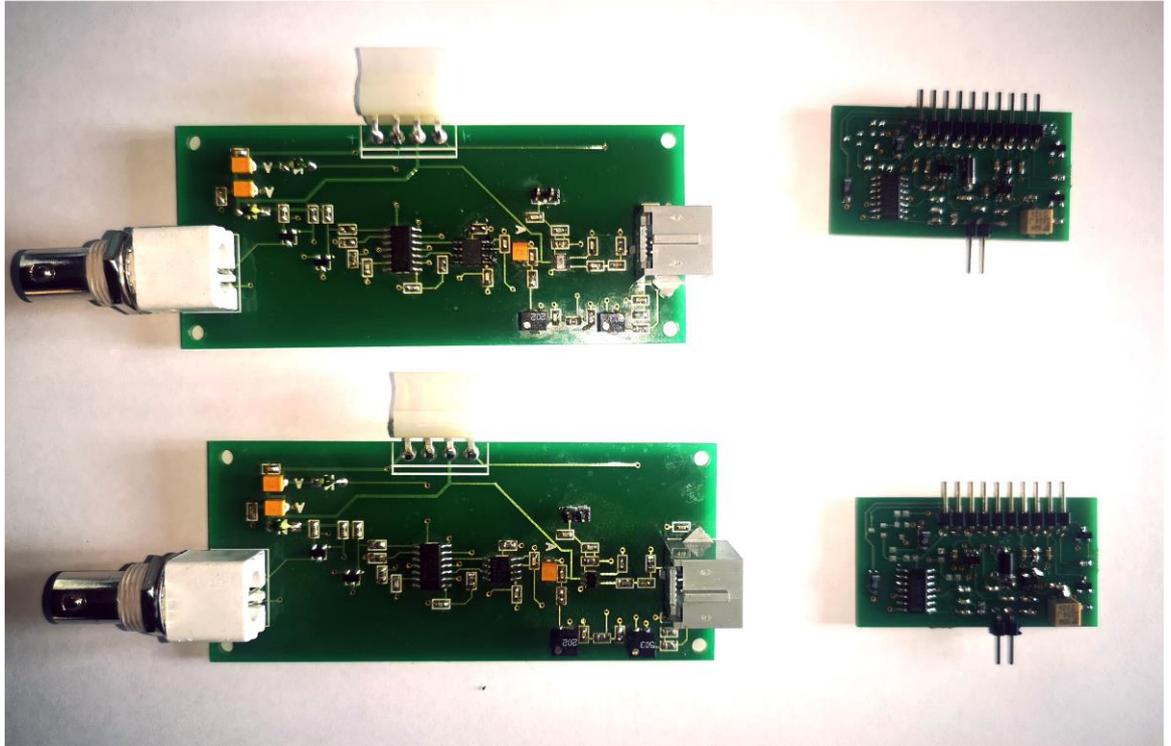


Рисунок 34 – Фото различных версий предусилителя

После обработки электрической схемы на первом поколении электроники, было разработано второе поколение электроники, значительно упрощающее и расширяющее возможности подобного типа детекторов.

При разработке данной электроники учитывался ряд требований.

- Питающее напряжение $+6\text{В}$
- Система должна быть модульная
- Выходные сигналы NIM и TTL
- Низкий уровень собственных шумов
- Высокая нагрузочная способность

Наличие одного питающего напряжения +6В используется для упрощения подключения, в частности не будет требоваться блок питания +33 В. Модульная система требуется для того, чтобы была возможность легко масштабировать систему под различное количество детекторов. Сигнал NIM требуется для совместимости со старым оборудованием, в то время как TTL используется для современных систем.

Во всех последующих версиях произошел отказ от схемы совпадения с 2-х SiPM. Это связано с тем, что реальный сигнал от нейтрона сильно больше, чем тепловой шум самих SiPM (не менее чем в 5 раз) [21] и совпадение по одно-двух фотонному шуму 2-х SiPM не способно вызвать срабатывание компаратора. Также порогом возможно отсечь большую часть событий, которые могут происходить от регистрации гамма, и упростить электронику, отказавшись от амплитудно-широтного анализа импульса [73]. Таким образом, задача регистрации импульса от SiPM упрощается до регистрации сигнала от одного SiPM. Второй SiPM используется для увеличения эффективной длины детектора и увеличения световыхода.

Усилитель-формирователь

Во втором поколении электроники был сделан ряд изменений. Первое — это значительно уменьшен размер платы. Добавлена возможность регулирования порога формирователя для подавления внутренних шумов усилителя формирователя. Проведена оптимизация электронной схемы для улучшения параметров. Также добавлена функция увеличения нагрузочной способности, основанной на компенсации тока перезарядки емкости SiPM.

Функция токовой компенсации SiPM требуется для уменьшения или полного исключения мертвого времени усилителя. Мертвое время связано с принципом работы SiPM. На рисунке 35 показана эквивалентная схема SiPM. Из схемы видно, что в структуре находится конденсатор. При попадании фотона в ячейку происходит создание электронной лавины, которая останавливается за счет

обратной связи. В момент после гашения лавины требуется некоторое время для перезарядки внутренней емкости ячейки.

Для исключения этого эффекта разработана схема, которая в момент разрядки ячейки и окончания формирования лавины происходит накачка ячейки зарядом и почти полностью исключает мертвое время ячейки [23]. Схема показана на рисунке 32 (б).

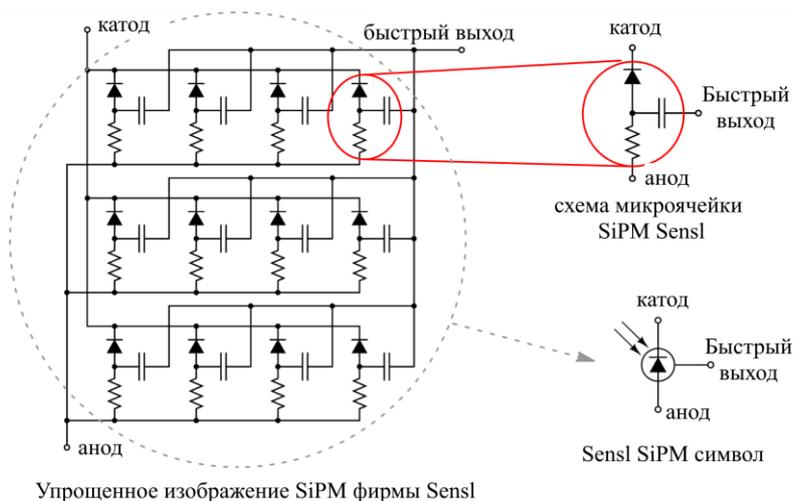


Рисунок 35 – Принципиальная схема ячейки SiPM

Рассмотрим работу счетчика. Схемы показаны на рисунке 32. В исходном состоянии напряжение на конденсаторах $C2$ и $C1$ соответствует напряжению рабочей точки. Через SiPM проходит темновой ток. При попадании вспышки света на SiPM на резисторе $R1$ формируется положительный сигнал. На формирователе выставлен порог, при превышении которого на выходе появляется сформированный импульс, который регистрируется. Далее следует процесс восстановления SiPM. Конденсаторы $C1$ и $C2$ начинают заряжаться через резисторы $R4$ и $R5$ с постоянной времени интегрирования $2.7 \cdot R4C1$ и $2.7 \cdot R5C2$. На резисторе $R1$ дифференцирующей цепи $C2R1$ и $C1R1$ образуется отрицательный выброс напряжения. Эта цепь возникает при отсутствии тока через SiPM. Цепь заряда $C2R5$ и $C1R4$ обладает инерционностью и возникает перекомпенсация напряжения рабочей точки, которая затем нивелируется появившемся темновым током SiPM. Амплитуда отрицательного выброса напряжения будет тем больше и,

соответственно, длиннее по времени, чем сильнее разряжена ёмкость SiPM. Амплитуда выброса увеличивает эффективный порог формирователя, и если следующая вспышка произойдет во время выброса, то формирователь не сработает. Следовательно, возникают просчеты формирователя. На рисунке 36, а приведена смоделированная типичная форма сигнала на SiPM, с ростом амплитуды растёт длительность выброса, где U_{κ} - напряжение срабатывания компаратора, t_b – время перекомпенсации.

В предложенном варианте вместо резистора R1 включен транзистор T1 с функцией жесткого контроля напряжения рабочей точки SiPM ($U_{p.t.}$). Резистор R8 задает напряжение рабочей точки SiPM. Резистор R7 задает ток заряда конденсаторов C2 и C9. Заряд происходит по линейному закону, а не логарифмическому и, следовательно, проходит гораздо меньшее время. Это время уменьшается в 2.7 раза. Расчеты времени зарядки емкости происходит по формулам:

$$T = \frac{(C9+C2) \times U_{p.t.}}{I_{зар}}, \quad (5)$$

$$I_{зар} = \frac{E - (U_{p.t.} + 0.7 \times V)}{R7}, \quad (6)$$

где, $U_{p.t.}$ – напряжение рабочей точки SiPM, T- время заряда конденсатора, $I_{зар}$ - ток заряда конденсатора, E- напряжение смещения SiPM заведомо больше, чем напряжение рабочей точки на 15%. Это напряжение общее для всех каналов прибора.

При достижении на конденсаторе напряжения, заданного резистором R8, напряжение на коллекторе транзистора T1, сравнивается с напряжением на базе и транзистор закрывается (выполняется функция ключа) и заряд конденсаторов C2 и C9 прекращается. Перекомпенсации напряжения не возникает и положительного выброса на выходе интегратора не возникает. Это дает уменьшение времени восстановления до константы интегрирования предусилителя и увеличение грузочной способности сцинтилляционного счетчика. На рисунке 36, б показана

смоделированная схема с функцией компенсации заряда и увеличением нагрузочной способности.

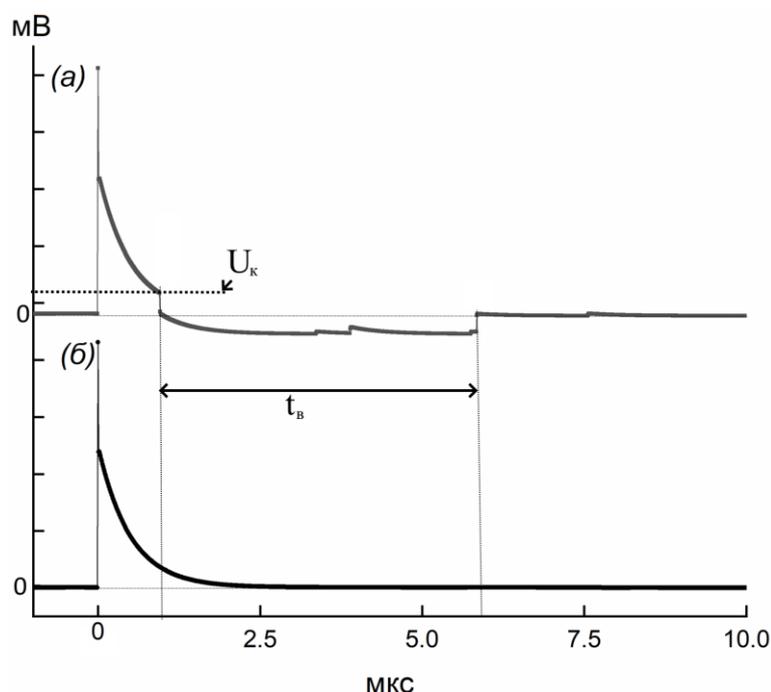


Рисунок 36 – Моделированные спектры сигналов с предусилителей, (а) – обычная схема, (б)- схема с функцией токовой компенсации

2.1.4 Сравнение световых выходов с детекторами на основе WLS

Для тестирования предложенного способа транспортировки фотонов было проведено сравнительное тестирование детекторов, которые имеют одинаковую геометрию, но различный тип световода. Кремниевые фотоумножители имеют прямую зависимость тока, протекающего через них, от количества сработавших ячеек, а следовательно, фотонов. Таким образом, измерение сигнала (осциллограммы) получаемого сигнала позволит сравнить количество фотонов, получаемых со световода (в случае использования трансимпедансного усилителя (ТИА), в котором напряжение на выходе прямо пропорционально току на инвертирующем входе).

Для этих целей были подготовлены 4 детектора: размеры световода 5x5x60 мм, 1 слой сцинтиллятора ZnS (Ag): ${}^6\text{LiF}$ размером 5x50 толщиной 0.45мм. В двух детекторах световод изготовлен из прозрачного PMMA пластика прозрачностью

92%, регистрация фотонов происходит с помощью двух кремниевых фотоумножителей EQR1511-3030D-S с размером активной области 3х3мм. На одном детекторе кремниевые фотоумножители располагались в торцах световода (DET1), на втором (DET2) сбор света осуществлялся линзой типа “рыбий глаз” (рисунок 27). Два других детектора (без линзы DET3, с линзой DET4) имели световод на основе полистирола (PS + 1% рТР + 0,1% 3-HF) с длиной волны максимальной эмиссии около 520-530 нм. На рисунке 37 приведен внешний вид световодов, полученных после механической обработки.



Рисунок 37 – Внешний вид световода после механической обработки

В дальнейшем происходила химическая полировка световодов парами дихлорэтана с последующей сушкой в течении 24 часов. После окончания подготовки световодов произведена клейка сцинтиллятора и кремниевых фотоумножителей клеем типа оптический цемент (EJ-500) с сушкой в вакууме при давлении не более 5 мбар в течении 24 часов при комнатной температуре. Клей EJ-500 использовался также для заполнения объёма линзы типа “рыбий глаз”. После завершения сушки происходила пайка проводов от кремниевого фотоумножителя и покрытие световода лентой из Политетрафторэтилена (PTFE

или ФУМ лента) толщиной 0.2 мм в 3 слоя с последующим покрытием черной непрозрачной термоусадочной трубкой для защиты от внешнего света. Торцы термоусадочной трубки заполнялись полиамидным черным герметиком. Внешний вид детекторов показан на рисунке 38.



Рисунок 38 - Внешний вид собранных детекторов

Схема проведения исследования.

В детекторах используется ранее нами не применяемый SiPM EQR1511-3030D-S который имеет, в частности, меньший коэффициент усиления (~в 15 раз). Это потребовало внести изменения в схему предусилителя, используемого ранее (рисунок 33(б)). В частности, изменено сопротивление R для увеличения коэффициента усиления. Напряжение питания предусилителя +6 В и -6 В, напряжение SiPM – 28.8 В + V_b (V_b=7.2 В).

Для записи сигналов, получаемых с кремниевых фотоумножителей использован CAEN DT5720 с разработанной программой для анализа и накопления спектров. Сигналы снимались независимо от каждого кремниевого фотоумножителя. Также дополнительно разработана программа для обработки массивов получаемых данных, анализа сигналов (в том числе PSD), расчета интеграла, построения гистограмм и графиков.

Исследование детекторов производилось попарно: DET1-DET3 и DET2-DET4. Схема проведения исследования показана на рисунке 39.

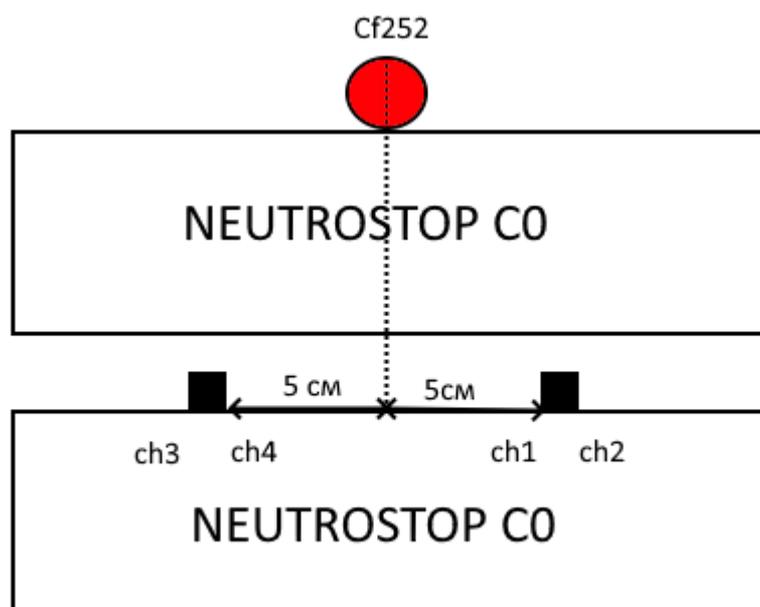


Рисунок 39 - Схема проведения исследования

В качестве источника нейтронов использован Cf252. Источник размещался на равном расстоянии от детекторов. Перед и после детектора размещался полиэтиленовый блок Neutrostop C0.

Определение шума каналов

В первую очередь были определены уровни шума детекторов. Уровень шума детектора складывается из шума кремниевого фотоумножителя и шума электроники. Шум кремниевого фотоумножителя в основном зависит от скорости темнового счёта (Dark current rate – DCR). Она определяется как скорость счёта на уровне одного фотона, которая создается тепловой генерацией электронов в активной области кремния, а не за счёт падающего на SiPM источника света. Также возможно влияние эффекта кросс-ток (crosstalk) и послеимпульсов (afterpulsing), но они не вносят большого влияния в тепловой шум и ими можно пренебречь.

Для усиления токовых сигналов с SiPM используется ТИА. Параметры усиления и шума подобных типов усилителей достаточно сильно зависят от качества

пайки и трассировки платы, которая может создавать паразитные емкости. Также разброс параметров неизбежен в зависимости от партии микросхемы операционного усилителя (в данном случае AD8055) и пассивных компонентов, что также вносит влияние на коэффициент усиления и шумовые параметры. Также система регистрации сигналов имеет свои шумовые параметры.

В случае кремниевых фотоумножителей они поставляются отобранной партией с достаточно близкими параметрами и можно пренебречь разницей в параметрах различных детекторов. Для системы предусилителей + ADC достаточно один раз провести измерения шума каналов.

Для фильтрации большинства шумов достаточно определить максимальную амплитуду сигнала. Для этого проводилась запись 1000 сигналов, превышающих порог -5 мВ и расчет гистограммы на основе максимальных значений амплитуды. Для этого к усилителям подключались детекторы DET1 и DET2. На рисунке 40 показана гистограмма полученных сигналов.

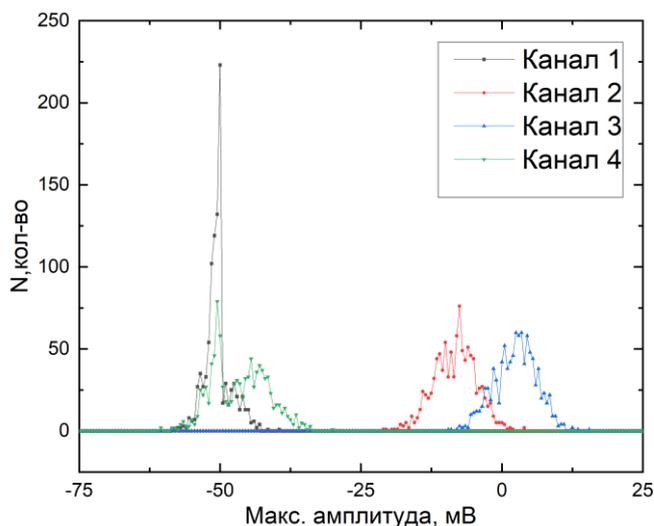


Рисунок 40 – Гистограмма шумов каналов регистрации

Обработка данных и результаты

Для каждого канала устанавливался индивидуальный порог срабатывания, запись события происходила в соотношении 20% до - 80% после порога. Для набора достаточной статистики происходила запись по 100 тыс. событий для каждого

детектора. Типичный сигнал, получаемый при регистрации фотонов кремниевым фотоумножителем, испускаемых при конвертации нейтрона, показан на рисунке 41. Поскольку сигнал от регистрации нейтрона имеет несколько временных констант, для анализа и сравнения рассчитывали интеграл (показан на рисунке 41)

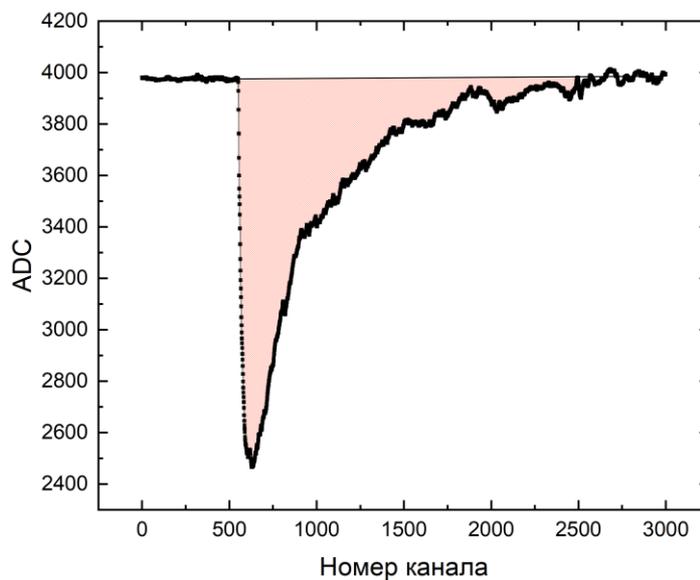


Рисунок 41– Сигнал, получаемый от регистрации нейтрона.

В первую очередь проведено сравнение интеграла сигнала, получаемого с детекторов. Для этого рассчитаны гистограммы сигналов. На рисунке 42 показаны результаты измерения.

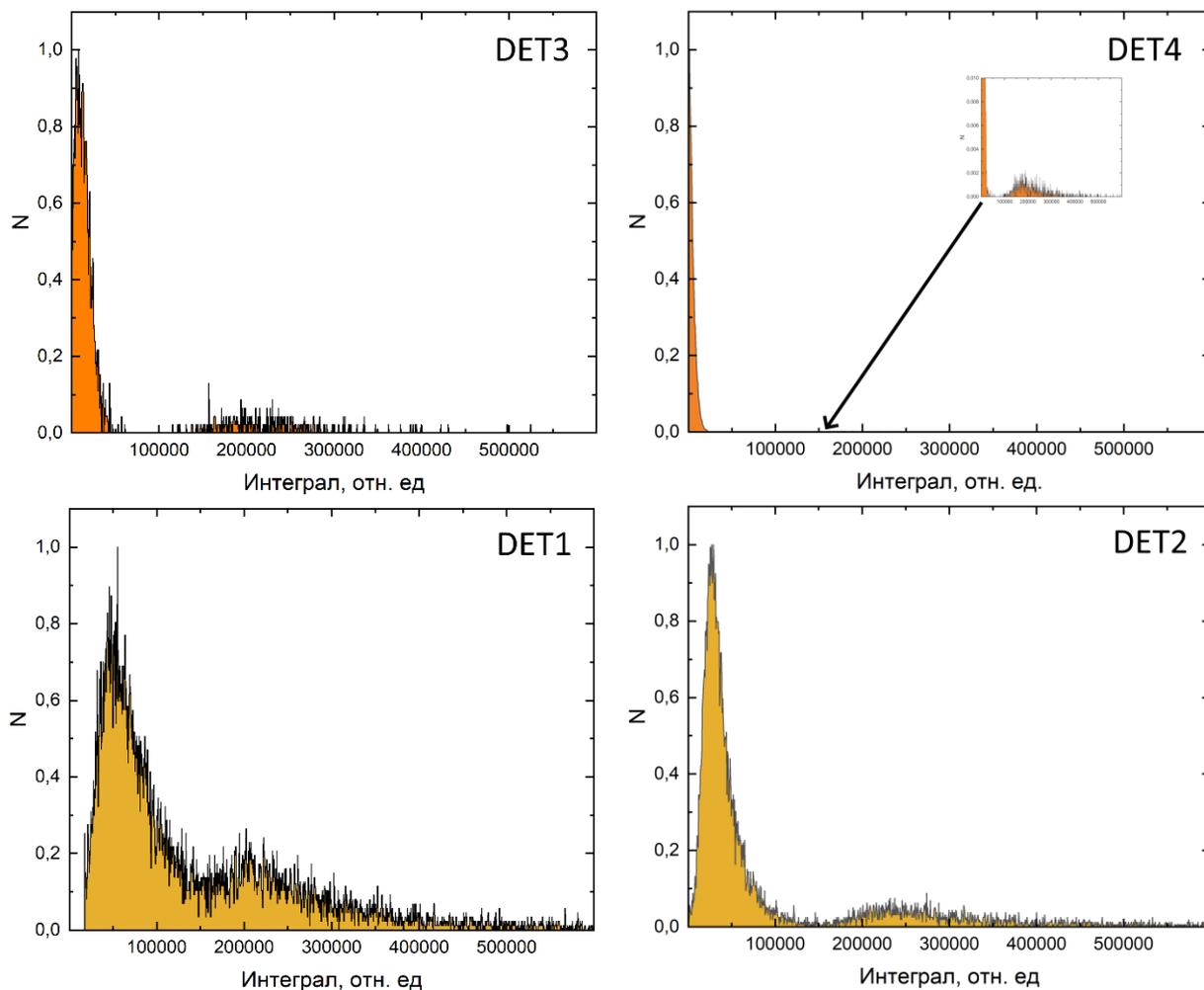


Рисунок 42– Интеграл сигналов, получаемых с детекторов (нормированы на 1).

Из представленных графиков можно сделать вывод, что детекторы на основе РММА (DET1 и DET2) имеют больший интеграл, а следовательно, большее количество фотонов доходит до кремниевого фотоумножителя. Так же для оценки разности в световыходе были рассчитаны центр пика, соответствующие максимальному количеству совпадений ($N=1$). Для более точного определения центра пики были подогнаны функцией *bigaussian*. Полученные значения DET1 = 40906.475, DET2= 27051.883, DET3= 9780.132, DET4=1950.451. Из этих данных можно сделать вывод, что световыход детектора со световодом на основе РММА со съемом света в торцах более чем в 4 раза больше, чем для детектора на основе WLS (для световода 5x5x60 мм). Для детекторов с линзами типа “рыбий глаз” световыход

отличается более чем в 13 раз, это косвенно подтверждает, что даже на длине 60 мм основной вклад в транспортировку фотонов вносит полное внутреннее отражение, и съем света линзой с поверхности не является оптимальным для WLS. Также эти данные показывают, что съем света линзами типа “рыбий глаз” дает света меньше на 34% (по сравнению с прямым съемом с торца). Это больше, чем значение полученное по результатам моделирования (около 15%) и, видимо, связано с качеством изготовления линзы и ее материалом.

Дополнительно проведен расчет интеграла сигналов от теплового шума детектора (Рисунок 43(сверху)). Также проведено исследование гамма-чувствительности. Ввиду отсутствия гамма-источника, исследование гамма-чувствительности проведено от источника Cf-252. Для этого перед и после детектора размещались листы кадмия, блоки NEUTROSTOP C0 заменили NEUTROSTOP C3. Гамма-фон в позиции детектора равнялся примерно 20 мкЗв/ч. Гистограмма сигналов получаемых сигналов представлена на рисунке 43 снизу.

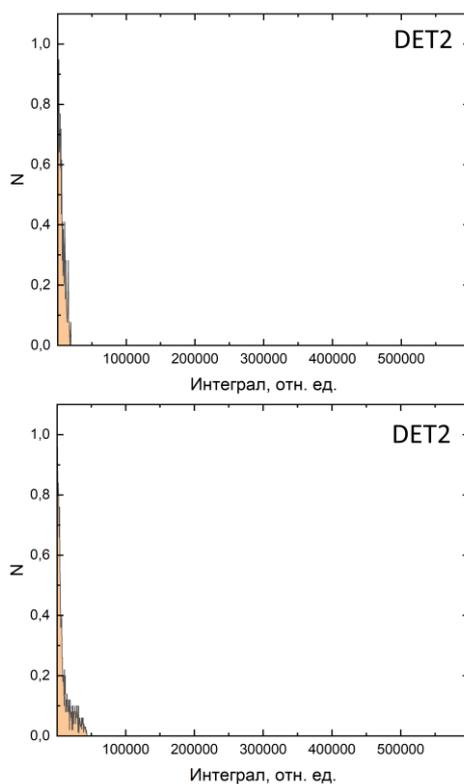


Рисунок 43 – Гистограмма теплового шума (Сверху), гистограмма от гамма-излучения (Снизу).

Выводы

В результатах измерений показано, что количество фотонов, регистрируемых кремниевыми фотоумножителями в детекторах на основе световода из PMMA, больше, чем в аналогичных детекторах на основе WLS. Это позволяет сделать вывод, что при небольших (до 200 мм) размерах световода наибольшее влияние на транспортировку фотонов оказывает прозрачность световода. Конструкция детекторов на основе PMMA основана на достижении максимальной прозрачности и диффузного отражения фотонов со всех сторон световода. Диффузное отражение позволяет равномерно распределить фотоны по всему объёму световода и донести максимальное количество до торцов световода. В свою очередь, доля фотонов, удовлетворяющих условиям полного внутреннего отражения минимальна. Затухание фотонов при использовании прозрачного световода имеет экспоненциальную зависимость (закон Бугера-Ламберта-Бера), что накладывает ограничение на максимальную длину. Также что немаловажно, использование световода на основе PMMA (или любого другого прозрачного материала) не требует согласования спектров поглощения и переизлучения для пары световод-сцинтиллятор, что в свою очередь позволяет использовать любой тип сцинтиллятора.

В свою очередь, для WLS, фотоны, которые выходят из сцинтиллятора и попадают в волокно, поглощаются и переизлучаются в соответствии с соотношениями между спектрами излучения, поглощения и эмиссии. Основной вклад в транспортировку фотонов, даже при небольших размерах световода, начинает иметь эффект полного внутреннего отражения. Поскольку доля этого излучения мала (но больше, чем для PMMA), то и количество фотонов тоже мало, но достаточно для достоверной регистрации фотонов. Сдвиг излучения в сторону зеленого света также уменьшает эффективность регистрации фотонов (в случае использования SiPM). В свою очередь, за счет полного внутреннего отражения световоды на основе WLS могут иметь намного большую длину (от 3 м). Также, что немаловажно, для детекторов на основе WLS как гамма, так и шумовые

гистограммы частично перекрываются нейтронным спектром (рисунок 43), что определяет использование методов анализа амплитуды для разделения сигналов. Для детекторов на основе РММА количество фотонов от сигнала регистрации нейтронов превышает как гамма, так и тепловой шум, и возможно отсечь, используя только дискриминацию по пороговому уровню.

2.1.5 Создание электроники для сбора и накопления данных

Для счета и накопления импульсов со сцинтилляционных детекторов разработан и создан ряд электроники. Она создавалась с учетом возможности полной замены электроники, существующей на данный момент на установках, расположенных на источнике ИН-06 ИЯИ РАН.

На момент начала работы нейтронного комплекса система сбора и накопления представляла собой систему на основе крейтов КАМАК [74]. Использование этой системы в современном мире представляется не удобным и связано, в первую очередь, с устареванием самого формата КАМАК и невозможностью найти замену крейта в случае поломки.

Система сбора и накопления данных представляла собой крейт КАМАК, в который устанавливался генератор ворот для Времени-цифрового преобразователя (TDC), несколько 8-канальных модулей TDC (в зависимости от требуемого количества детекторов) и контроллер крейта КАМАК, который подключался к ПК с помощью платы PCI. Управление системой происходит с помощью специальной программы и драйвера под систему UNIX.

Самым простым вариантом модернизации электроники является модификация существующих модулей под крейт VME. Но, во-первых, это выходит достаточно дорого, а также возникает необходимость разработки модуля TDC с требуемыми параметрами, который соответствует нашим задачам. Также потребует написания новой управляющей программы.

Было принято решение отказаться от идеологии крейт-систем, и сделать максимально простую в управлении систему сбора и накопления данных, так как у

нашей команды имелся опыт по созданию подобной электроники и управляющих программ [26, 27]

Для этих целей было разработано 2 типа электроники: первая для накопления данных по времени пролета (TDC) и вторая для счета импульсов при измерениях на постоянной длине волны (СИ-П) или для мониторных детекторов.

Основные требования предъявляемые к TDC:

- Количество входных каналов не менее 16;
- Формат входных каналов счетчиков (TTL 5v и NIM);
- Программная установка задержки синхроимпульса;
- Программная установка ширины канала;
- Ширина канала от 0.01 мкс до 12.5 мкс;
- Количество временных каналов 4096;
- Установка задержки синхроимпульса в пределах 0.01 мкс до 256 мкс;
- Вывод питания +6 В DC - 3А для питания сцинтилляционных счетчиков;
- Управляющая программа на Windows;

Основные требования, предъявляемые к счетчику импульсов при постоянной длине волны (СИ-П):

- Питание от +5VDC до +12VDC;
- Количество каналов не менее 16;
- Формат входных каналов счетчиков (TTL);
- Интерфейс для связи с ПК CANBUS и RS-232;
- Управляющая программа на Windows

Опишем подробнее каждый из модулей:

Времяпролетная электроника

Time-to-digital converter (TDC) или ВЦП модуль служит для счета и измерения количества импульсов за фиксированные интервалы времени. Формально задача, которую решает TDC, — определение временного интервала между событиями. В качестве события, как правило, выступает срабатывание какого-либо детектора.

Основное применение многоканальных систем TDC — это различные детекторы высоких энергий и частиц. Там, где требуется высокоточные измерения временного интервала (от пикосекунд). За счет такой высокой точности цена на эти модули держится на высоком уровне.

В отличие от всех этих применений, типичная ширина канала при дифракционных измерениях на времяпролетном спектре всего 0.5–8 мкс. Также типичное время интегрирования предусилителя детектора составляет 1 мкс. В связи с этим нет требований в пикосекундной точности измерения, что упрощает требования к проектированию подобных систем.

Возможным вариантом создания подобной системы — это создание TDC на основе ПЛИС (FPGA). Программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) — электронный компонент (интегральная микросхема), используется для создания конфигурируемых цифровых электронных схем [75]. В отличие от обычных цифровых микросхем, логика работы ПЛИС не определяется при изготовлении, а задаётся посредством программирования (проектирования). Из-за того, что требуется ширина канала около 0.5–8 мкс, возможно при проектировании пренебречь внутренними задержками на кристалле и значительно упростить разработку модуля.

В качестве тестовой ПЛИС использована макетная плата Arty A7-35T. Основные особенности:

- Чип FPGA Xilinx- XC7A35TICSG324-1L
- Logic Cells 32,280
- Logic Slices 5,200
- Flip-flops 29,200
- Block RAM (Кбит) 1,800
- DSP Slices 90

Xilinx Artix-7 FPGA имеет встроенный генератор до 450MHz и АЦП. Программируется через JTAG и Quad-SPI Flash. Имеет 256MB DDR3L с 16-битной шиной 667MHz. По параметрам данная плата подходит для создания TDC.

Встроенной высокоскоростной памяти BRAM достаточно на организации работы 16 счетчиков по 4096 каналов с разрядностью 16 bit ($16 \cdot 4096 \cdot 16 = 1\,048\,576$ bit или $\approx 1,048$ Кбит).

В качестве самого простого интерфейса для организации связи с ПК возможно использовать USB-UART на чипе FTDI. Теоретическая максимальная скорость работы 2.4 мегабита/сек, что позволит достаточно быстро передавать данные на ПК и максимально снизить простой при передаче данных.

Разработка TDC

На рисунке 44 показана блок-схема работы полученного TDC.

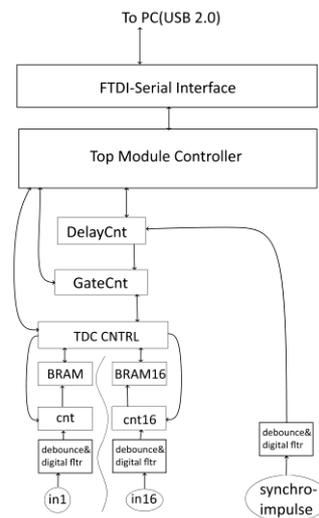


Рисунок 44 – Блок-схема работы TDC

Логика работы: По приходу синхроимпульса, сигнал обрабатывается цифровыми фильтрами и поступает на модуль задержки. В модуле задержки происходит задержка сигнала на величину, установленного в регистре задержки. После задержанного сигнала синхроимпульса происходит запуск генератора ворот, который выдает 4096 импульсов для суммирования и сброса данных счетчиков с интервалом, равном регистру ширины канала. По сигналу запись происходит суммирование текущего показания счетчика с данными в BRAM. После каждого входного сигнала стоит модуль цифровой обработки для фильтрации помех. 16 счетчиков и 16 ячеек BRAM объединены одним модулем верхнего уровня, который

отвечает за запись и чтение памяти, распределения сигналов с генератора ворот и обработки сигнала READ: (запуск счета). Top Module Controller отвечает за обработку команд по UART интерфейсу (Чтение, запись, сигнал READY), установку регистров задержки и ширины канала. Также он отвечает за измерение частоты входного сигнала синхроимпульса. Модуль UART работает на частоте 921600 бод, parity - нет, data bit - 8 bit, stop bit - 1 bit. Управляющие команды показаны в таблице 2

Таблица 2.

Комманда	byte	1	2	3	4	5	6	7	-	47	48	49	50	51	52	53	54	-	EndByte
Частота_с ин	Отправка	C	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Прием	C	1	FRQ	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Сигнал Ready	Отправка	C	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Прием	C	2	READ Y BIT	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Чтение мон с синх	Отправка	C	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Прием	C	chn1	data1	data1	chn2	data2	data2	-	chn16	data16	data16	R	-	-	-	-	-	-
Чтение мон	Отправка	C	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Прием	C	chn1	data1	data1	chn2	data2	data2	-	chn16	data16	data16	R	-	-	-	-	-	-
Чтение с TDC	Отправка	C	5	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Прием	C	chn1	data1	data1	chn2	data2	data2	-	chn16	data16	data16	R	C	data1	data1	chn2	-	E
Установка задержки	Отправка	C	6	DATA	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Прием	C	6	DATA	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Уст. ширины TDC	Отправка	C	7	DATA	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Прием	C	7	DATA	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Сброс данных	Отправка	C	8	1	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Прием	C	8	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Язык написания логики – Verilog, среда Xilinx Vivado 2019, Управляющая программа для персонального компьютера написана на языке NI LabView. Язык был выбран из соображений простоты написания программы, а также легкости добавления нужных функций по мере разработки. Основные функции – задание параметров задержки и ширины канала, чтение частоты синхроимпульса, проведения накопления и сохранения данных. Для приема большого объема данных по UART задан большой размер входного буфера (5Мбит).

Счетчик импульсов при постоянной длине волны (СИ-П)

СИ-П разрабатывался, в первую очередь, для встроенных применений и возможности объединения множества устройств в одну сеть. В качестве интерфейса связи был выбран CANBUS. Входной сигнал со счетчиков имеет

формат TTL. Модуль основан на ПЛИС Xilinx Spartan 3e xc3s250e и микроконтроллере Atmel SAM3x8e.

Была написана управляющая программа для микроконтроллера, организующая работу по CAN шине. В таблице 3 показаны основные команды, реализуемые в микроконтроллере. Контроллер управляется по CAN, 500 кбит/с, расширенный формат кадра. Первичный ID задается при записи прошивки МК, но также возможно изменить ID во время работы. Все параметры сохраняются в энергонезависимой памяти. В самой последней модификации добавлена возможность управления порогами предусилителя по интерфейсу SPI.

Таблица 3.

Описание команды		byte0	byte1	byte2	byte3	byte4	byte5	byte6	byte7
Версия ПО	Отправка	0x01		0x00					
	Прием	Ver.H	Ver.L	0x00					
Идентификатор устройства	Отправка	0x02		0x00					
	Прием	0x43	0x61	0x6e	0x43	0x6e	0x74	0x72	0x31
Сброс данных счетчиков	Отправка	0x03		0x00					
	Прием	0x52	0x45	0x53	0x45	0x54	0x5F	0x30	0x31
Чтение показаний счетчика	Отправка	0x04		0x00					
	Прием	Номер канала		Показания счетчика		Номер канала	Показания счетчика		
Счетчик с предустановкой	Отправка	0x05	0x00	0x00		Значение времени			
	Прием	Номер канала		Показания счетчика		Номер канала	Показания счетчика		
Установка CAN ID	Отправка	0x06	ID	ID	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00
	Прием	0x00	0x00	0x00	ID	ID	0x00	0x00	0x00

Все это объединено в одной общей плате. На рисунке 45 показан первый вариант готовой платы СИ-П.



Рисунок 45 - Первый вариант СИ-П

Основные отличия между платами, это то, что в последней версии доработана система питания (в частности, добавлена защита от КЗ, переплюсовки и т. д.), оптимизировано расположение микросхем для улучшения теплоотвода, и добавлены дополнительные входы/выходы как для ПЛИС, так и для микроконтроллера.

Программное обеспечение

Все программное обеспечение для работы с детекторами написано на языке NI LabVIEW. LabVIEW (англ. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) — это среда разработки и платформа для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования «G» фирмы National Instruments (США). Первая версия LabVIEW была выпущена в 1986 году для Apple Macintosh, в настоящее время существуют версии для Unix, Linux, Mac OS и Microsoft Windows. LabVIEW используется в системах сбора и обработки данных, а также для управления техническими объектами и технологическими процессами. Идеологически LabVIEW очень близка к SCADA-системам, но в отличие от них в большей степени ориентирована на решение задач не столько в области автоматизированных систем управления технологическими процессами, сколько в области автоматизированных систем научных исследований.

Основные особенности:

- Легкость освоения
- Есть готовые библиотеки для подключения различных устройств (контроллеры перемещения, шаговые двигатели, датчики)

- Простота работы с различными интерфейсами связи
- Возможность создания Real-time Приложений

Все эти особенности определили возможность использования данного языка для написания различных комплексов для управления оборудованием, в том числе и специализированным и научным. Например, этот язык использован для написания программы SPICE предназначенной для управления приборами рассеяния нейтронов [76].

На основе этого языка написано все управляющее программное обеспечения и получен ряд свидетельств на программное обеспечение [26, 27].

2.2 Позиционно-чувствительные сцинтилляционные детекторы

Помимо одиночных детекторов нейтронов, в дифракционных экспериментах находят применение позиционно-чувствительные детекторы. В мире активно ведется разработка и создание новых позиционно-чувствительных сцинтилляционных детекторов [77, 78, 79]. В данной работе, в качестве продолжения развития одиночных сцинтилляционных детекторов нейтронов, были промоделированы и созданы тестовые детекторы с возможностью определения координаты [16].

Первые позиционно-чувствительные детекторы на основе сцинтилляторов создавались для физики высоких энергий. Например, в 1988 был описан большой детектор установки CDF. Принцип работы подобных детекторов основан на создании двух массивов спектросмещающих (WLS) волокон, расположенных перпендикулярно друг к другу, между которыми расположен сцинтиллятор. Для определения координаты в подобном детекторе необходимо независимое усиление и регистрация фотонов в каждом волокне.

Разрешение подобных детекторов определяется, в первую очередь, размером WLS, которые на данный момент имеют размеры от 0.2 до 2 мм. Для регистрации фотонов долгое время использовался ФЭУ, который имеет крайне низкий уровень шума и высокий коэффициент усиления (10^7 и более). В настоящий момент, при

создании подобных типов детекторов, все активней стали заменять его кремниевым фотоумножителем.

В данной работе стояла задача исследовать возможность создания позиционного-чувствительного детектора, основанного на ином принципе. В предложенном детекторе вместо WLS используется прозрачный органический световод, обладающий большим коэффициентом затухания фотонов (по сравнению с WLS). Предложенный метод основан на анализе амплитуды при использовании ограниченного количества кремниевых фотоумножителей (от 2 до 4).

Основная идея заключается в том, что фотоны, испускаемые при конверсии нейтронов, проходят разное расстояние. Так как световод не идеальный, то в нем происходит затухание первоначальной вспышки. Соответственно, при регистрации фотонов в торцах световода, будет различная амплитуда сигнала, связанная с длиной пути проходящими фотонами. На рисунке 46 приведено упрощенное пояснение данного метода.

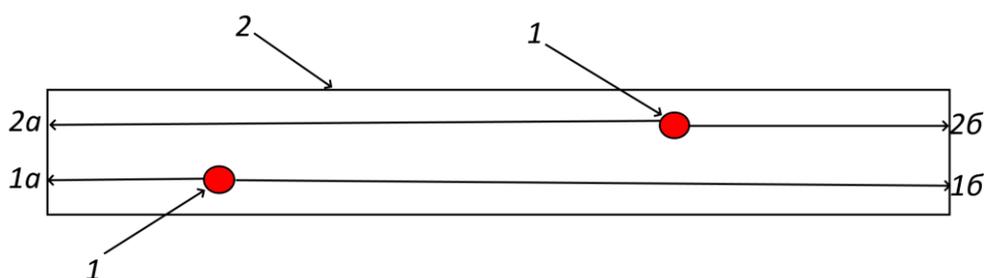


Рисунок 46 – Принципиальная схема метода определения координаты на основе анализа амплитуды, 1 – вспышка фотонов, 2 - световод

На рисунке 48 $1a$ и $1b$ будут иметь различную амплитуду из-за разной длины пробега фотонов в световоде, а $2a$ и $2b$ будут иметь близкую амплитуду т. к. пробег приблизительно равен. В реальном детекторе на амплитуду сигнала также будет влиять тип покрытия, так как происходит множественное отражение от всех поверхностей.

2.2.1 Моделирование оптических параметров

Для оценки параметров пропускания света и количества фотонов, попадающих на кремниевый фотоумножитель, было проведено моделирование в программе оптического моделирования TracePro. В отличие от более универсального программного пакета GEANT4, она не позволяет моделировать взаимодействие частиц с веществом, но при этом достаточно легко и быстро позволяет смоделировать оптические параметры детекторов, что показано в ряде работ [80, 81]. Программа позволяет оценить заданную оптическую модель и ее оптические параметры.

Более подробное описание моделирования находится в главе 2.1.1.

Одномерный позиционный детектор

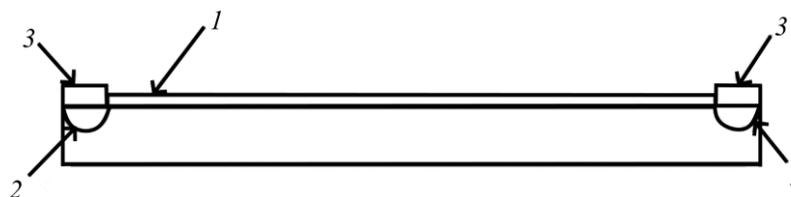


Рисунок 47 – Внешний вид детектора, 1 – сцинтиллятор, 2 - линза типа рыбий глаз, 3 – кремниевый фотоумножитель.

В первую очередь проведено моделирование одиночного детектора, показанного на рисунке 47. Данный детектор является аналогом газового детектора LPSD. Размеры детектора: 5 мм ширина, 50 мм общая длина, длина сцинтиллятора 40 мм, толщина 5 мм. В данной модели стояла цель оценить, возможно ли определения координаты данным методом и сравнить 2 типа покрытия детектора, зеркальное типа Аланод и диффузный отражатель.

Для оценки этих параметров происходило измерение количества фотонов, падающих на фотоумножители при изменении положения источника фотонов. Изменение положение источника фотонов происходило в диапазоне от 0 до 40 мм с шагом 5 мм. На рисунке 48 показан процент зарегистрированных фотонов на фотоумножителе в зависимости от расстояния источника.

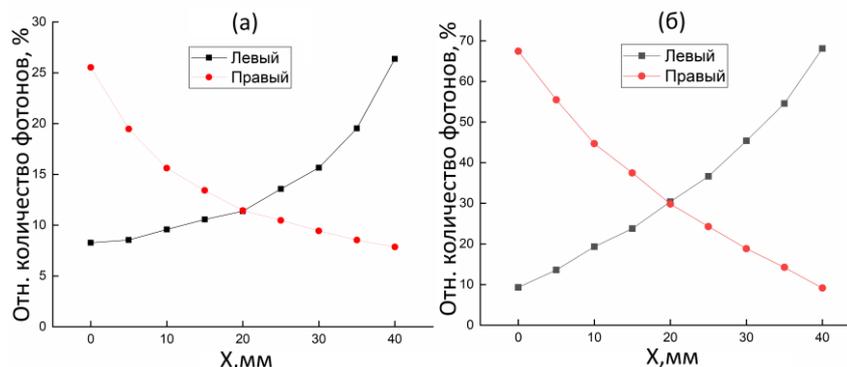


Рисунок 48 – Процентное соотношение зарегистрированных фотонов от общего количества фотонов, (а) покрытие типа Аланод, (б) покрытие типа диффузный отражатель

Из результатов моделирования показано, что зеркальное покрытие типа Alanod Miro дает меньшее отражение, и до фотоумножителей доходит примерно 34% фотонов от общего количества. В отличие от него, покрытие типа диффузный отражатель обладает лучшим отражением и до SiPM доходит примерно 77% от общего количества фотонов.

Из этих измерений можно сделать вывод, что при использовании органического световода подобной конфигурации оптимально использовать именно диффузный отражатель, а не зеркальный. В реальном детекторе диффузионный белый отражатель реализуется покрытием его белой фторопластовой лентой либо покраска его белой краской с Диоксидом титана, например EJ-510.

Двухмерный позиционный детектор

На втором этапе была произведена оценка оптических параметров двухкоординатных позиционно-чувствительных детекторов, определение координаты которых основано на затухании света в световоде. Для реализации были выбраны 2 модели с активной областью 50x50 мм и различной геометрией. Геометрия рассмотренных детекторов показана на рисунке 49. В детекторах используется 1 слой сцинтиллятора. Первая форма детектора основана на квадрате, где сделаны скосы под 45 градусов для крепления кремниевого фотоумножителя.

Вторая форма — это квадрат с дополнительными линзами для концентрации фотонов с квадрата сцинтиллятора. Сделано это для исследования, возможного, более высокого разделения фотонов и более точного определения координаты.

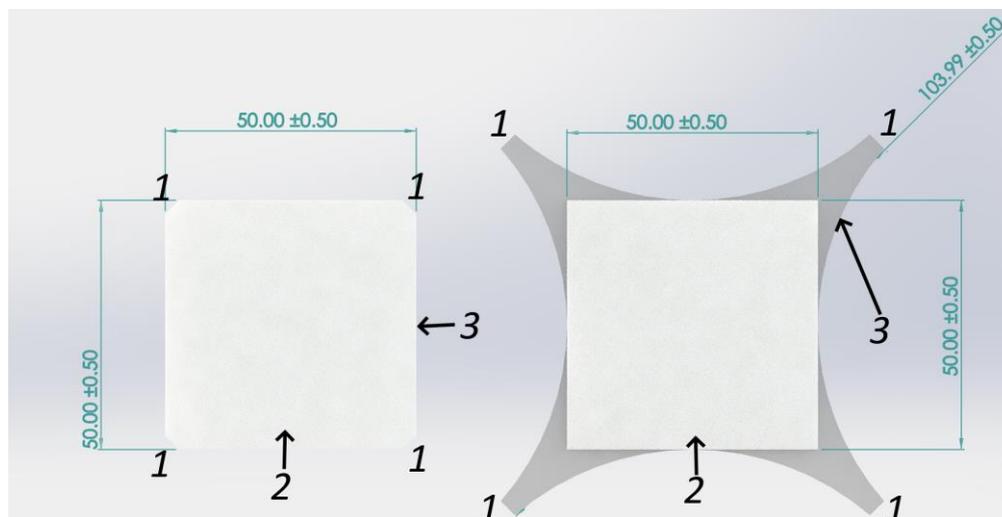


Рисунок 49 – Геометрия моделируемых детекторов, где 1 - место расположения SiPM, 2 - Сцинтиллятор, 3 - Световод

Моделирование оптических параметров, как и ранее, заключалось в движении источника фотонов и определения количества фотонов, падающих на фотоумножители. Для анализа исследовались амплитуды с двух противоположных кремниевых фотоумножителей.

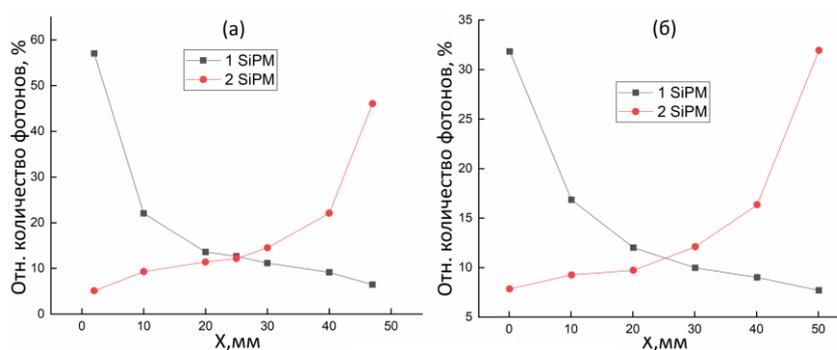


Рисунок 50 – Процентное соотношение зарегистрированных фотонов от общего количества фотонов, (а) – первая модель, (б) – вторая модель.

На рисунке 50 показано относительное количество фотонов с 2-х противоположных SiPM. Центр сцинтиллятора на графике 25 мм, источник

фотонов сдвигался в диапазоне от -25 мм до +25 мм от центра. Как видно, в крайних позициях эффективность разделения сильно возрастает. Связано это расстоянием от источника фотонов до кремниевого фотоумножителя. Это показано на рисунке 51, где показано отношение количества фотонов с противоположных кремниевых фотоумножителей. Видно, что при приближении источника фотонов к кремниевому фотоумножителю растет соотношение интенсивностей.

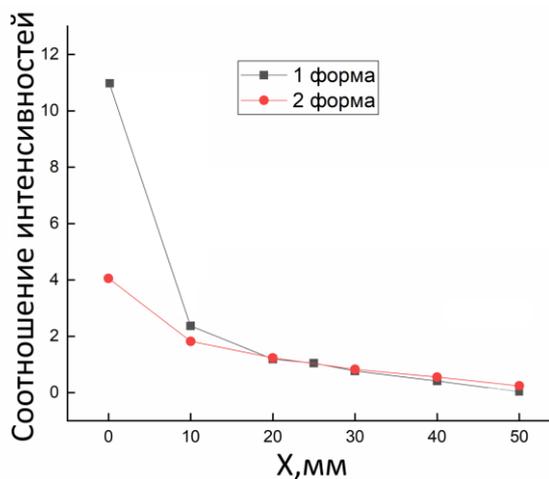


Рисунок 51 – Соотношение интенсивностей противоположных фотоумножителей

Определения координаты подобного типа детекторов сводятся к анализу амплитуд либо заряда, получаемых с кремниевых фотоумножителей. Для определения координаты нужно минимум 2 кремниевых фотоумножителя для одной координаты. Количество фотонов, испускаемых при регистрации нейтрона и дошедших до объёма сцинтиллятора, связано с неоднородностями по составу в объёме сцинтиллятора, различной длиной пробега вторичных частиц, а также сильно зависит от толщины сцинтиллятора.

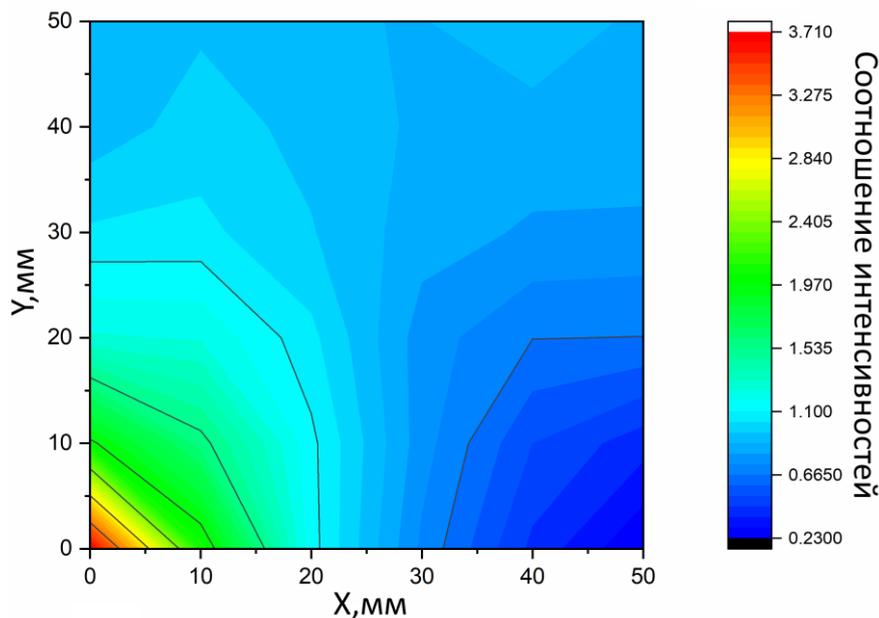


Рисунок 52 – Карта соотношения интенсивностей

Для определения координаты необходима предварительная калибровка детектора для получения карты отношений амплитуд в зависимости от расположения точки регистрации нейтронов. На рисунке 52 – показана подобная карта, моделированная для второй версии детектора, и для двух противоположных фотоумножителей. Для расчета координаты требуется измерения амплитуд фотоумножителей на реальном детекторе и составление подобных карт. После становится возможным получения координаты на основе анализов амплитуды, получаемой с четырех кремниевых фотоумножителей.

Подобные карты возможно получить моделированием, но таким способом не получится добиться высокого разрешения (более 10 мм). Связано это в первую очередь со способом изготовления, в котором возможны неоднородности при клейке кремниевых фотоумножителей и сцинтиллятора, а также отличиями в электронной части детектора. Поэтому конечное разрешение по многим параметрам зависит от ошибки измерения, шумов электроники и качественно проведенной калибровки.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что данный метод определения координаты можно реализовать в детекторах нейтронов. В качестве

покрытия детектора рекомендуется использовать диффузный отражатель, так как его использование позволяет значительно увеличить сбор света. При проектировании детекторов одним из важных параметров является расстояние между кремниевыми фотоумножителями. Так же немаловажное значение играет тип покрытия. При использовании данного метода один из важных параметров — это соотношение сигнал-шум электроники. Оно может оказывать сильное влияние на пространственное разрешение детектора.

2.2.2 Изготовление прототипов детекторов

Для исследования параметров линейных ПЧД были изготовлены 4 вида детекторов.

Схема детекторов основана на детекторах, описанных в главе 2.1.2. Габаритные размеры детектора 5x60 мм, размер сцинтиллятора 5x50 мм, количество слоев сцинтиллятора - 1. В качестве сцинтиллятора использован ВС-704 ZnS(Ag):6LiF 1:2, толщиной 0,45 мм. Световод основан на оргстекле размером 5x60мм со светопропусканием 92% (для 400–800 нм). В качестве SiPM выбраны 2 варианта: Sensl MicroSC/FC 30035 и Hamamatsu s12572-015p.

Параметры SiPM от Sensl: количество ячеек 4774, квантовая эффективность 47%, коэффициент усиления $6 \cdot 10^6$. Параметры Hamamatsu: коэффициент усиления $2,30 \cdot 10^5$, темновой шум 0,98М, Напряжение питания SiPM 71,6 В, количество ячеек 40000, квантовая эффективность 25%. Hamamatsu имеет меньшую квантовую эффективность и меньший коэффициент усиления, но при этом имеет большее количество ячеек, что позволяет обрабатывать большее количество фотонов без перегрузки SiPM.

Сцинтиллятор приклеен к световоду клеем типа оптический цемент. В дальнейшем, после полного отвердевания клея, один образец детектора покрывался диффузионной отражающей лентой фторпласт-4, второй образец оставался без покрытия. Сделано это для того, чтобы произвести сравнения влияния покрытия на разрешение. Для экранирования от внешнего света весь детектор покрывался

термоусадочной непрозрачной черной трубкой с коэффициентом усадки 1:4. Внешний вид детектора показан на рисунке 53, а .

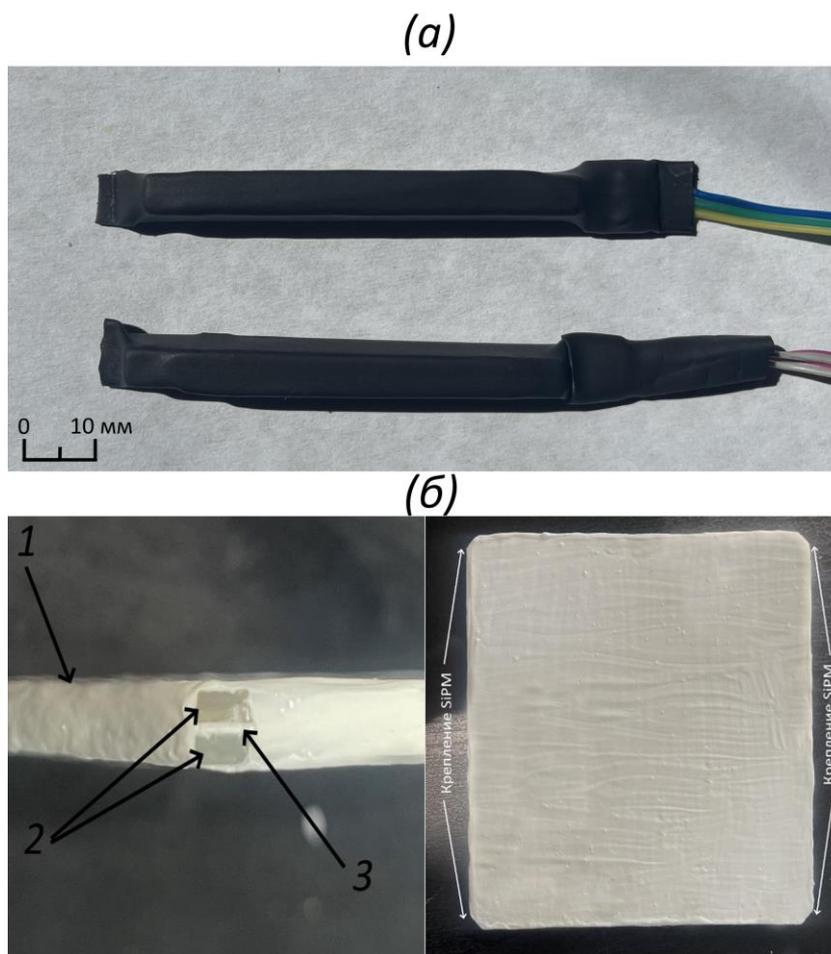


Рисунок 53 – (а)- Внешний вид детектора линейного ПЧД, (б) - Внешний вид среза световода в месте крепления SiPM, 1 - светоотражающий состав, 2- световод, 3 - Сцинтиллятор

Для исследования параметров двухмерных ПЧД изготовлено 2 детектора размерами 100x100мм и 50x50мм. В качестве конвертора нейтронов использован коммерческий сцинтиллятор фирмы Saint-Gobain на основе ZnS(Ag):6LiF с эффективностью регистрации нейтронов 42%, толщина — сцинтиллятора 0.45 мм. Сцинтиллятор вклеен между 2мя частями световода толщиной 2 мм. В торцах световода размещены кремниевые фотоумножители NDL EQR10 11-3030D-S. После вклейки световода и сцинтиллятора, весь детектор покрывался диффузно-отражающей краской на основе BaSO₄. Схема имеет отличия от модели, описанной

выше. В частности, сцинтиллятор расположен в объёме сцинтиллятора. Эти изменения внесены для того, чтобы была возможность сбора фотонов с 2х сторон сцинтиллятора и увеличения общего количества фотонов. Внешний вид световода показан на рисунке 53, б.

ГЛАВА 3. Тестирование детекторов нейтронов

Разработанные детекторы в различных вариантах устанавливались на установки импульсного источника ИН-06 и РАДЭКС ИЯИ РАН.

В Институте ядерных исследований РАН на основе сильноточного линейного ускорителя протонов сооружен комплекс экспериментальных установок для нейтронных исследований, включающий импульсный источник нейтронов ИН-06, установку для радиационного материаловедения РАДЭКС. Работу нейтронного комплекса ИЯИ РАН обеспечивают сильноточный линейный ускоритель и технологические системы экспериментального комплекса [82].

Основу ускорительного комплекса составляет линейный ускоритель со следующими проектными параметрами: ускоряемые частицы: протоны и ионы Н, – энергия 600 МэВ, средний ток 500 мкА, импульсный ток 50 мА, длительность импульса 100 мкс (реально до 200 мкс), частота повторения импульсов 100 Гц. Ускоритель включает в себя два инжектора (ионы Н⁺ и Н⁻) – на энергию 750 кэВ, инжекционный тракт, начальную часть ускорителя до энергии 100 МэВ и основную часть до энергии 600 МэВ.

Начальная часть включает пять ускоряющих резонаторов с трубками дрейфа, работающих на частоте 198.2 МГц, основная – 27 четырехсекционных резонаторов с шайбами и диафрагмами на частоте 991 МГц. Предусмотрен промежуточный вывод пучка с энергией 160 МэВ. В ближайшее время будет обеспечена возможность одновременной работы различных нейтронных мишеней с использованием пучка ионов Н⁻ одновременно с пучком протонов [71, 83].

В настоящее время ускоритель реально обеспечивает следующие параметры ускоренного пучка: энергию – до 307 МэВ; импульсный ток – до 16 мА; частоту повторения импульсов – до 50 Гц; длительность импульса – до 200 мкс; среднюю интенсивность ускоренного пучка – до 150 мкА при энергии 160 МэВ и до 50 мкА при энергии 257 МэВ. Относительно средней интенсивности следует отметить, что все импульсные системы ускорителя, включая инжектор и систему ВЧ-питания, работают в настоящее время с частотой повторения 50 Гц.

Величина среднего тока, которая реально получается при максимально возможном импульсном токе, частоте повторения и длительности импульса, составляет 150 мкА. В процессе работы с сильноточным пучком непрерывно контролируются параметры основных систем ускорителя, а также характеристики пучка, такие как ток, потери, стабильность энергии и при необходимости ее абсолютное значение [83, 84].

3.1 Источники нейтронов, используемые для тестирования детекторов

Подробнее о каждом из источников нейтронов. Первый — это импульсный источник нейтронов ИН-06. По проекту ИН-06 состоит из двух независимых источников нейтронов, расположенных каждый в своем боксе в общей биологической защите, и способных работать одновременно. Различие определяется длительностью импульса протонов, направленных на нейтронобразующую мишень. На рисунке 54 показан внешний вид мишеней.

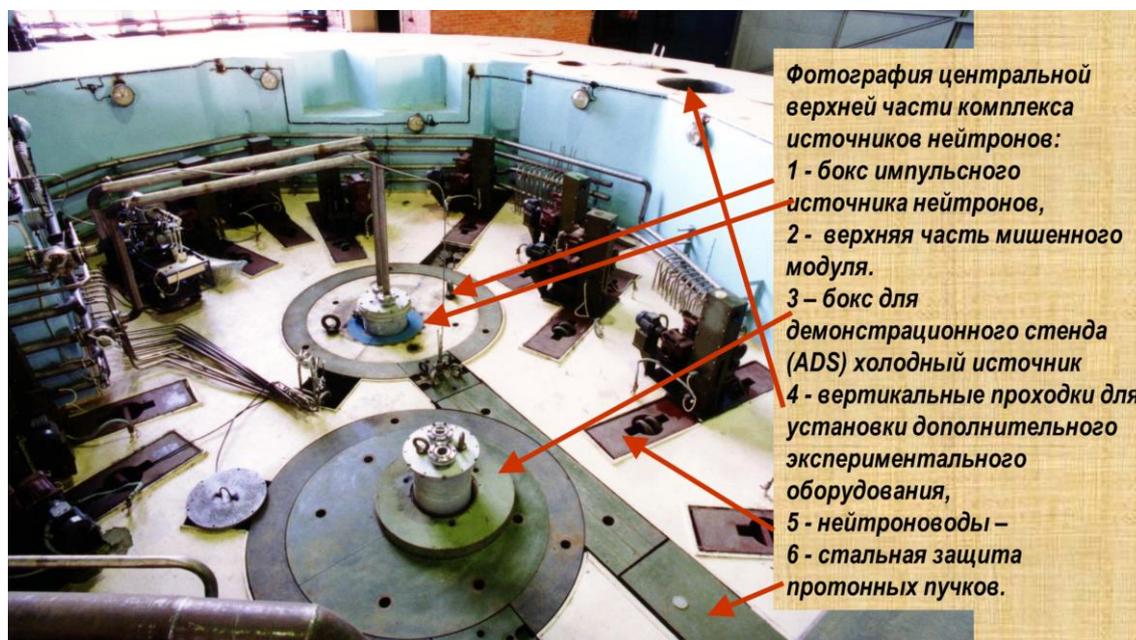


Рисунок 54 – Внешний вид мишеней источника ИН-06

В первом боксе располагается вольфрамовая мишень с водяным замедлителем, на которую в настоящее время подается пучок протонов с параметрами, определяемыми ускорителем. Для выведения пучков нейтронов из

замедлителя к экспериментальным установкам, источник имеет семь каналов диаметром 204 мм. При этом четыре канала направлены в экспериментальный зал, а три — за пределы экспериментального корпуса.

Малое количество каналов накладывает специфические требования к установкам и условиям выведения нейтронов: многофункциональность установок и, по возможности, раздвоение пучков нейтронов для увеличения количества используемых установок. Схема расположения установок и каналов показана на рисунке 55.



Рисунок 55 - Схема расположение установок источника ИН-06 ИЯИ РАН

В настоящий момент на источнике используются следующие установки:

- Рефлектометр–малоугловой дифрактометр “Горизонт”;
- Многофункциональный нейтронный спектрометр “МНС”;
- Дифрактометр для исследования вещества в экстремальных условиях “Геркулес”;
- Дифрактометр “Кристалл”.

Спектры прямых пучков источника ИН-06 показаны на рисунке 56 [83, с. 9]

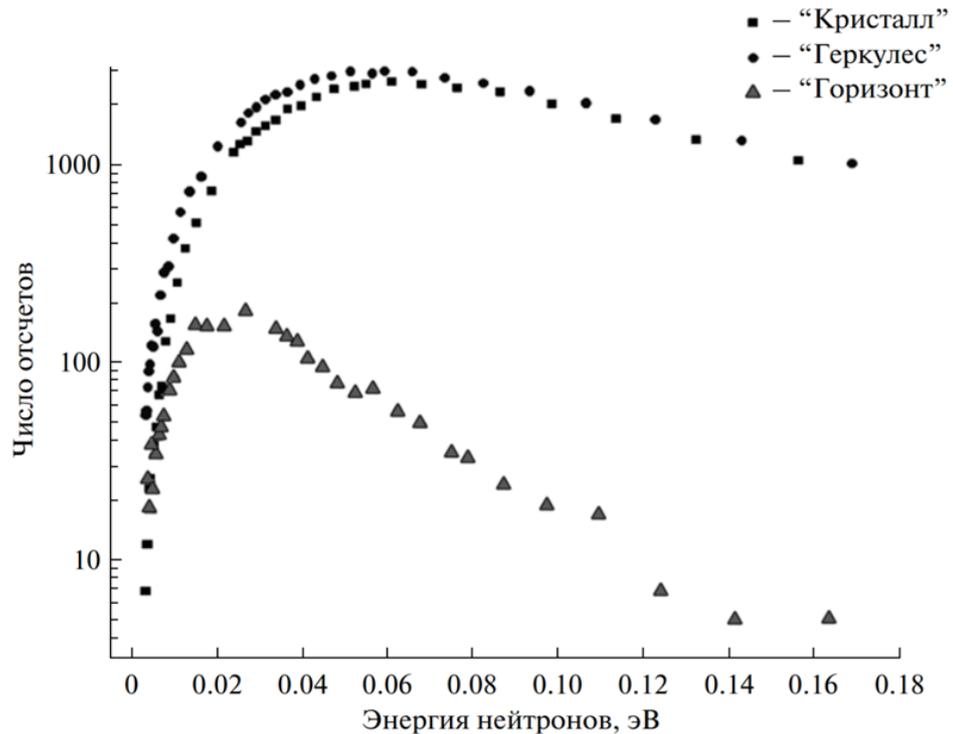


Рисунок 56 - Спектры прямых пучков источника ИН-06

Вторая мишень, на которой проводилось тестирование детекторов, это РАДЭКС [70]. По проекту ММФ в зале экспериментального комплекса сооружена ловушка протонного пучка РАДЭКС (RADEX — RADiation EXperiment), предназначенная для испытания материалов в высокоинтенсивных радиационных полях. В настоящее время она модифицирована в импульсный нейтронный источник для проведения исследований по методу времени пролета (TOF-спектрометр). TOF-спектрометр состоит из следующих основных частей [70].

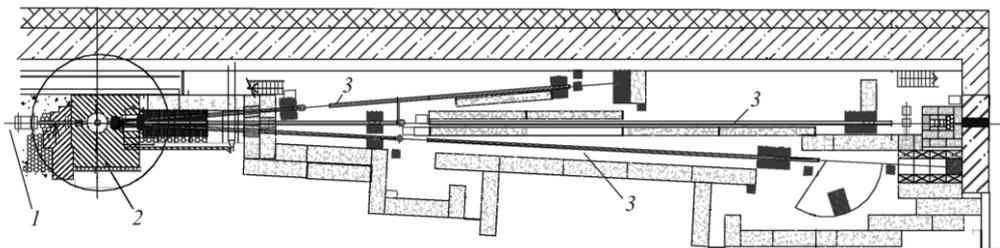


Рисунок 57 – Схема TOF-спектрометра “РАДЭКС”. 1 – протонный пучок, 2 – импульсный нейтронный источник в защите, 3 – три времяпролетных канала с экспериментальными зонами и ловушками в конце (кроме вертикального канала)

Вольфрамовая мишень оптимизирована для поглощения протонного пучка с энергией до 500 MeV при среднем токе до 350 мкА. Далее стоит водяной замедлитель для формирования нейтронного спектра в области тепловых и эпитепловых нейтронов толщиной 3 см. Вакуумные каналы (три горизонтальных и один вертикальный) выведены для организации времяпролетных измерений. Ловушки нейтронных пучков, расположены в конце каждого канала. Все это окружено биологической защитой нейтронного источника и экспериментальных зон.

Имеются шесть экспериментальных зон на пролетных расстояниях 10, 20, 30 и 50 м для размещения установок (рисунок 57). Для проведения исследований по времени пролета, структура нейтронного пучка должна соответствовать требованиям эксперимента. Нейтронные импульсы должны иметь малую длительность для получения высокого энергетического разрешения и относительно малую частоту, чтобы избежать наложения рециклических нейтронов.

Поэтому режимы работы нейтронного спектрометра должны различаться в области тепловых, медленных и резонансных нейтронов, т. е. для исследований структуры атомных ядер и исследований конденсированного состояния. В первом случае длительность импульса должна быть 0.25–1 мкс, а во втором — на два порядка больше. С помощью формирователя протонного сгустка в инжекторе ускорителя можно плавно изменять длительность импульса протонов с соответствующим пропорциональным изменением флюенса нейтронов в мишени.

В штатном режиме работы ускорителя (длительность протонного импульса 60 мкс) максимальный флюенс нейтронов испарительного и каскадного спектров в мишени в настоящее время достигает $0.9 \cdot 10^{15}$ н/с/см². Расчет показывает, что на поверхности замедлителя плотность потока нейтронов с энергией от тепловой до 100 кеВ достигает $\sim 2 \cdot 10^{11}$ н/с/см².

3.2 Тестирование на установках ИЯИ РАН

На установке РАДЭКС проводилось сравнительное тестирование гелиевых счетчиков СНМ-17 и сцинтиляционных счетчиков. Параметры ускорителя: $I_{имп}=5\text{мА}$, длительность протонного пучка 150 мкс, Частота повторения 10 Гц, Энергия пучка 267 МэВ. Расстояние образец детектор 400 мм.

Для сравнения было собрано 2 идентичных сектора. В одном устанавливались 6 счетчиков (объединённых по 2 на угол) гелиевых счетчиков СНМ-17, во втором — 3 сцинтиляционных счетчика. На рисунке 58 показано взаимное расположение секторов относительно образца и пучка нейтронов.

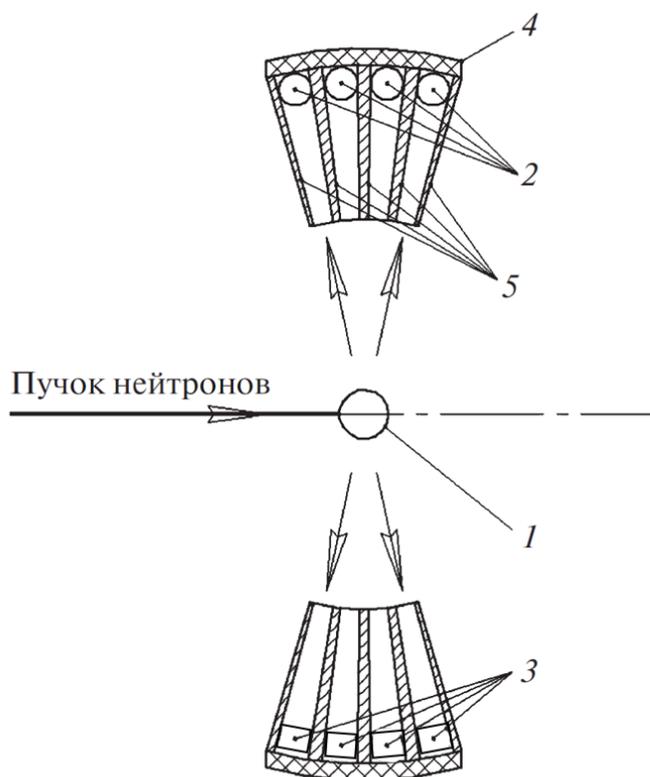


Рисунок 58 – Схема установки для испытаний детекторов на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС, 1 – образец; 2 – гелиевые счетчики; 3 – сцинтиляционные счетчики; 4 – защита – борсодержащий полиэтилен; 5 – кадмиевые щелевые коллиматоры

Результаты измерений показаны на рисунке 59. В качестве образца для измерений использовался порошок синтетического алмаза.

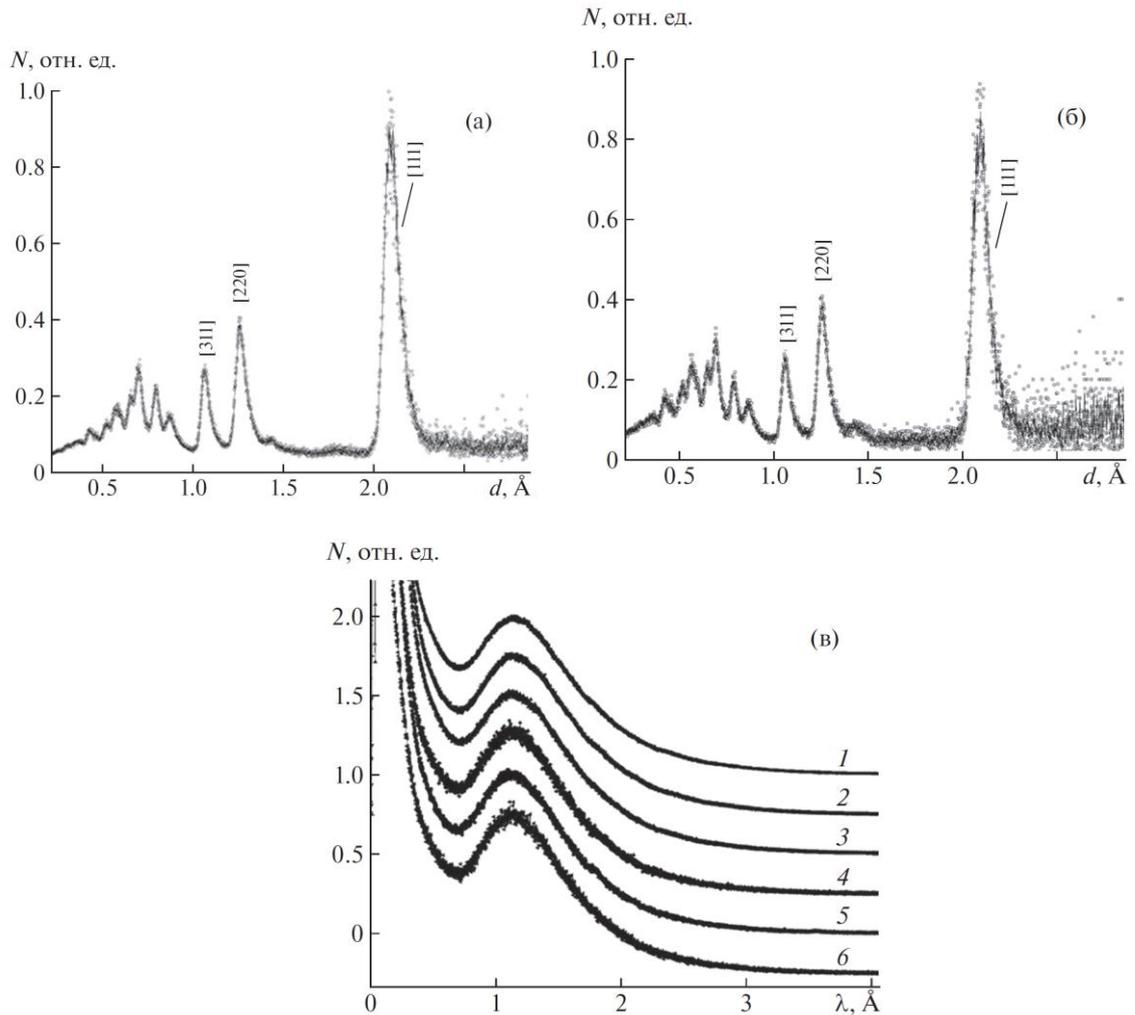


Рисунок 59 – Времяпролетные спектры, измеренные на порошке синтетического алмаза с помощью гелиевых (а) и новых сцинтилляционных (б) счетчиков; в – нормировка на соответствующие спектры ванадия (1–3 – гелиевые счетчики, 4–6 – сцинтилляционные счетчики)

Также проводилось тестирование различных версий детекторов на установке “КРИСТАЛЛ”. Параметры ускорителя: $I_{\text{имп}}=10\text{мА}$, длительность протонного пучка 100 мкс, Частота повторения 10 Гц, Энергия пучка 267 МэВ. Расстояние образец детектор – 30 см. На рисунке 60 показан спектр 2-х различных сцинтилляционных детекторов, расположенных на близких углах. Эффективность сцинтиллятора отличается примерно в 2 раза.

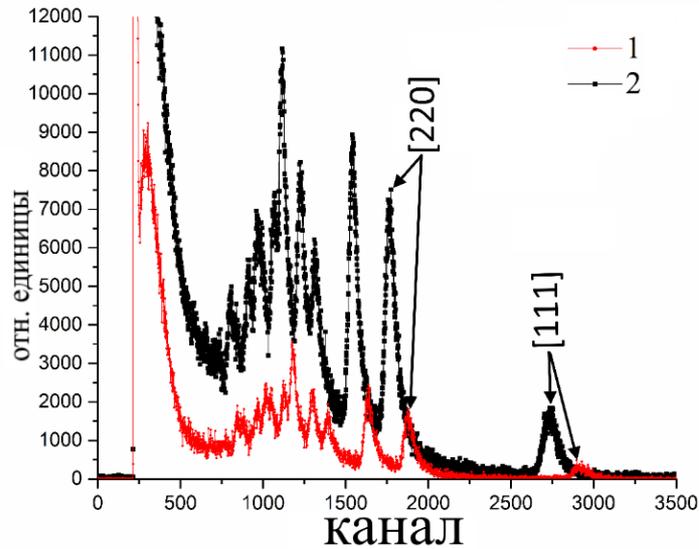


Рисунок 60 - Нейтронограммы порошка технического алмаза, полученные с помощью первого (1) и второго (2) варианта сцинтилляционного счетчика нейтронов. На пиках указаны индексы Миллера.

На импульсном источнике ИН-06 в институте ядерных исследований РАН совместно с Физическим институтом им. П. Н. Лебедева создан многофункциональный нейтронный спектрометр [85]. В настоящее время установка работает как порошковый дифрактометр: реализованы два блока обратного рассеяния. Разрешение многофункционального нейтронного спектрометра не является рекордным, однако идея установки заключается в объединении на одном пучке нейтронов спектрометров неупругого и упругого рассеяния, включая дифрактометр малоуглового рассеяния, для одновременного определения динамических и структурных параметров исследуемых материалов [85]. Для сбора дополнительных дифракционных данных на углах 89-90-91 градуса установлены 3 сцинтилляционных детектора. Расстояние образец — детектор 180 мм, размер счетчика 5x50 мм. Проведены измерения образца жаропрочного сплава MoTiC.

На рисунке 61 показано сравнение массива гелиевых счетчиков (17 штук), расположенных на обратном угле, и одиночного сцинтилляционного счетчика, расположенного на угле 90 градусов. Параметры ускорителя: $I_{\text{имп}}=5\text{мА}$,

длительность протонного пучка 150 мкс, Частота повторения 10 Гц, Энергия пучка 267 МэВ. Расстояние образец детектора для сцинтилляционных детекторов равна 18 см, для массива гелиевых детекторов — около 150 см.

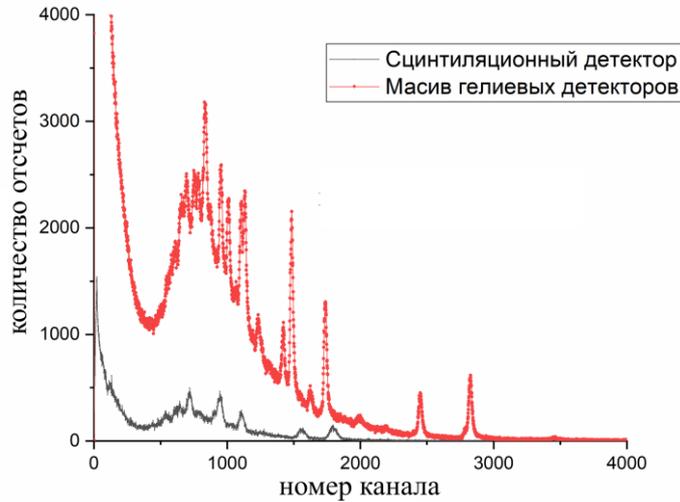


Рисунок 61 – Сравнительный времяпролетный спектр

В 2017 году на установке “ТЕРКУЛЕС”, для проведения исследований структуры и динамики конденсированных сред при высоких давлениях и криогенных температурах, детекторная система полностью заменена на сцинтилляционные. Детекторная система состоит из двух секторов на 8 детекторов. Размер детекторов 15x120 мм, эффективность регистрации нейтронов 60%. За все время работы на установке проведены измерения различных образцов, представим лишь несколько из них.

Первый это образец жаропрочного сплава 38ХНЮ [86,87], эксперимент включал в себя измерение ряда образцов с различной твердостью. Предполагалось сравнить механизм закалки данного материала с похожим материалом 40ХНЮ. На рисунке 62 показаны необработанные данные измерения образца 38ХНЮ.

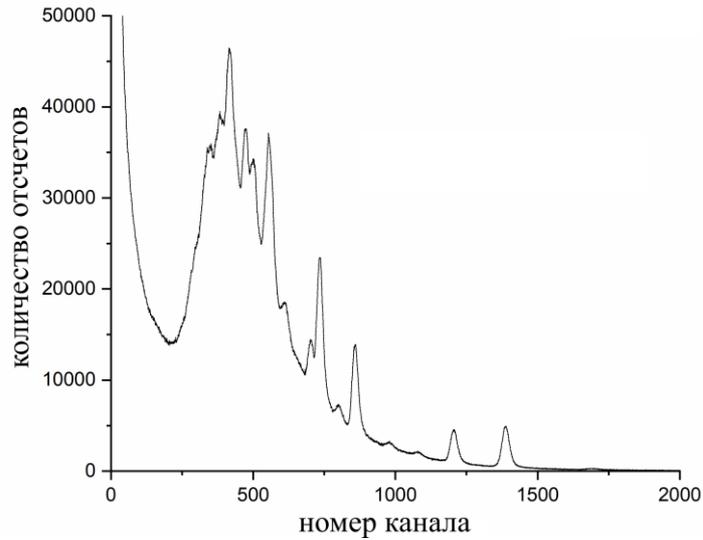


Рисунок 62 – Необработанные данные измерения образца 38ХНЮ

Также проводилось измерение серии образцов 40ХНЮ для оценки возможности использования материала для камер высокого давления и изучения механизма увеличения твердости. На рисунке 63 показана обработанная нейтронограмма 40ХНЮ. Из полученных данных найдено отличия в параметрах решетки твердого и мягкого образца 40ХНЮ.

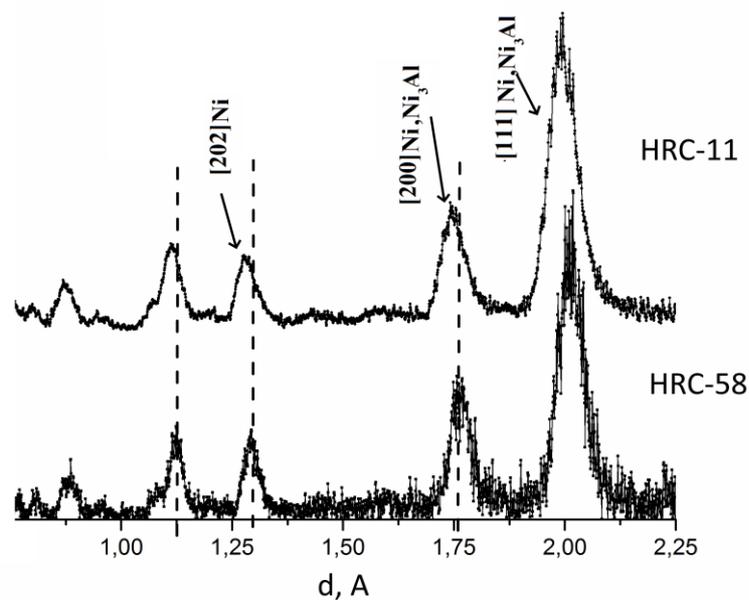


Рисунок 63 – Нейтронограмма измерений сплавов 40ХНЮ с различной твердостью

На рисунке 64 показаны тестовые измерения камеры высокого давления с NaCl и измерения синтетического алмаза [87].

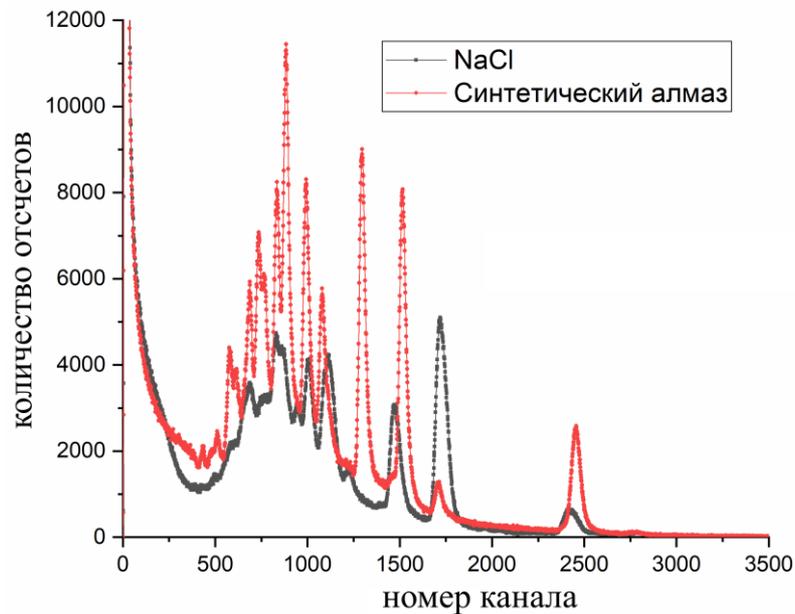


Рисунок 64 – Тестовые измерения камеры высокого давления с NaCl и тестовые измерения синтетического алмаза

Также были исследованы образцы жаропрочных сплавов. Полученные данные успешно обработаны методом Ритвельда [19].

Серия дифракционных измерений показала, что использование световода из органического стекла не вносит погрешности в полученные данные. Разрешение полученных детекторов зависит только от ширины. К полученным данным можно применять те же методы обработки данных что и к другим типам детекторам. Детекторы могут успешно заменять существующие гелиевые детекторы типа СНМ.

3.2.1 Определение эффективности

На установке “КРИСТАЛЛ” создана установка для тестирования детекторов и электроники на времяпролетных нейтронных спектрах, а также от радиоизотопного источника ^{252}Cf . Для тестирования на установке присутствуют:

- Для формирования нейтронного пучка присутствуют различные коллиматоры, щели из кадмия, замедлители нейтронов (блоки Neutrostop C0, бериллий, D2O)

- Для проведения эксперимента: блок TDC и СИ-П

- Для оценки параметров электроники, временных параметров: осциллограф, мультиметр, блок CAEN digitizer DT5720, Rigol DS8204-R

Для определения эффективности изготовленных детекторов проведено сравнение с образцовым детектором на спектре от источника ИН-06. Исследуемый детектор основан на сцинтилляторе с эффективностью поглощения 48%, размер чувствительной области 5x50 мм, количество слоев 2. В качестве образцового детектора использовался пропорциональный счетчик «Гелий-3» высокого давления (8 атм. ^3He) фирмы «Консенсус». Из соотношения счетов гелиевого и сцинтилляционного счетчиков, с учетом их чувствительных площадей и паспортных данных, получена абсолютная эффективность сцинтилляционного счетчика — 70% (для 1.8 А). Также проведено тестирование детектора с 1 слоем сцинтиллятора эффективностью поглощения нейтронов 42%. Абсолютная эффективность регистрации нейтронов составила около 40% (для 1.8 А).

Дополнительно, для получения зависимости эффективности регистрации нейтронов от количества слоев, изготовлены макетные детекторы с различным количеством слоев сцинтиллятора. Измерения параметров производились от источника нейтронного излучения ^{252}Cf .

Во время проведения измерений, чтобы обеспечить радиационную защиту сцинтилляционного счетчика, был построен короб из свинцовых кирпичей толщиной не менее 10 см. Он полностью покрывал объем, в котором находился счетчик, и имел входное окно для пучка нейтронов размером 10x60 мм. Для термализации нейтронного потока от источника нейтронного излучения использовалось 20 см блоков из полиэтилена NEUTROSTOP C0 фирмы ООО "Копос Электро". Детекторы размещались на расстоянии 150 см от источника. В качестве анализатора амплитуды использовался CAEN DT5720. Было проведено

по 5 измерений длительностью 100 секунд с источником нейтронов. Для определения собственного шума детекторов было проведено такое же количество измерений без источника.

Для учета термализации и рассеяния нейтронов на блоках NEUTROSTOP был использован сцинтилляционный счетчик с известной эффективностью. Для этого на место тестируемых счетчиков помещался однослойный счетчик с эффективностью $40 \pm 2\%$.

Для получения теоретической эффективности был использован метод, который использовался в других работах по созданию многослойных детекторов [88]. Суть его в том, что за основу берется эффективность поглощения нейтронов. Отталкиваясь от этой эффективности, мы считаем, что первый слой сцинтиллятора задерживает 42% нейтронов. Тогда на второй слой падает 58% нейтронов, который захватывает 42% от 58% нейтронов. И так далее на каждый следующий слой. Исходя из этого были рассчитаны теоретическое значение эффективности детекторов для количества слоев от 1 до 5.

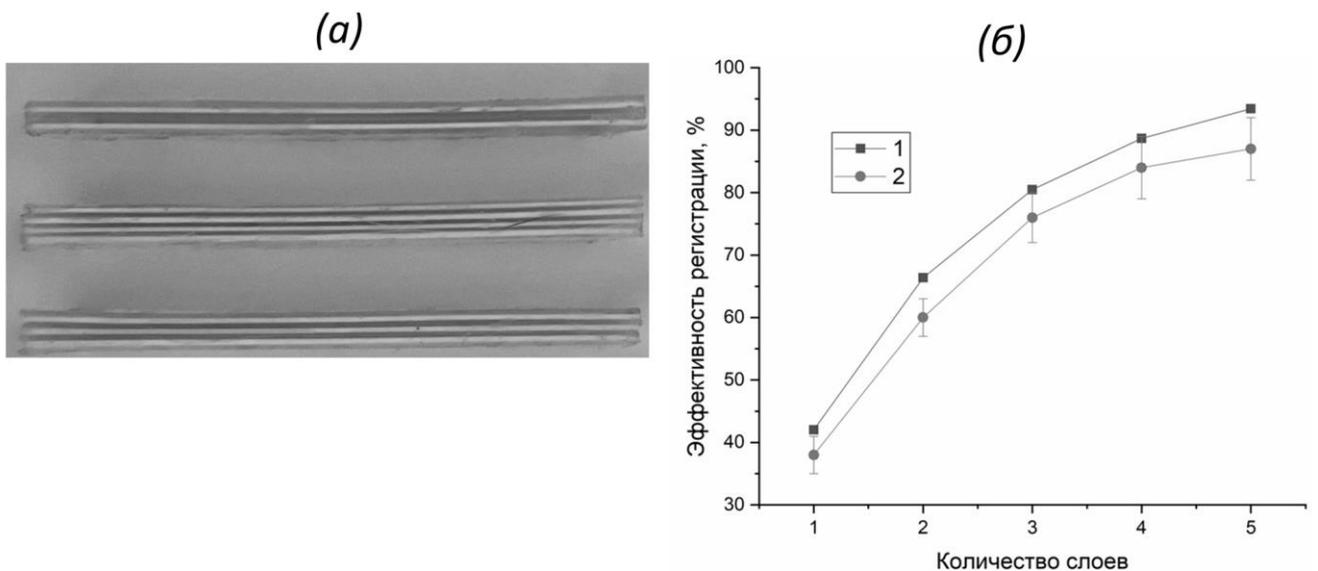


Рисунок 65 – (а) - Внешний вид детекторов с различным количеством слоев, (б) - График зависимости эффективности от количества слоев, 1- рассчитанное значение, 2 – экспериментальное

На рисунке 65 показаны полученные значения тестовых детекторов и сравнение их с максимальной расчетной эффективностью. К сожалению, во время теста не представлялась возможность выделить именно тепловые нейтроны с энергией 1.8 Å, поэтому данные эффективности представлены для нейтронов всех энергий, падающих на тестовый счетчик.

На зависимости видно, что экспериментальные данные по эффективности достаточно близко повторяют теоретическую зависимость. Чуть меньшее значение, видимо, связано с особенностями производства либо с тем, что первый и последний слои не содержат световод с двух сторон, и событие, которое происходит на самой поверхности сцинтиллятора, может быть не зарегистрировано.

Дополнительно проведено повторное сравнительное тестирование, но на времяпролетном нейтронном источнике ИН-06 однослойного и трехслойного детектора. На рисунке 66 показано сравнительное тестирование на времяпролетном нейтронном спектре эффективности 2-х детекторов с различным количеством слоев сцинтиллятора. Слева показан сравнительный счет 2-х детекторов в зависимости от времени. На правом времяпролетный спектр от образца Ванадия. Детектор первой версии содержит 1 слоя сцинтиллятора с эффективностью 42%, вторая версия – 3 слоя с той же эффективностью. Размеры детектора: 5x5x60 мм.

По результатам измерения, детектор с тремя слоями имеет примерно на 30% большую эффективность для тепловых нейтронов (от 1.7 до 2 Å). Это косвенно подтверждает корректность проведенных исследований зависимости эффективности от количества слоев на источнике ^{252}Cf .

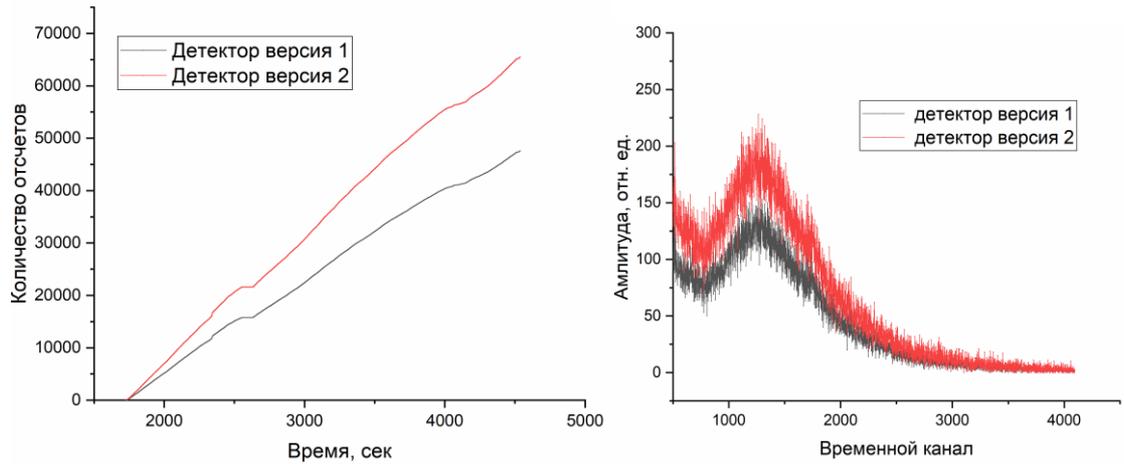


Рисунок 66 – Сравнительные тесты однослойного и трехслойного детектора, слева – счет от времени, справа – времяпролетный спектр от ванадия.

Выводы

По результатам тестовых измерений различных материалов, и сравнения их с гелиевыми детекторами, показано, что детекторы имеют достаточно высокую эффективность. За счет высокой эффективности, хорошего разрешения (ширина 5мм) и простоты конструкции детекторы возможно использовать для замены существующих гелиевых детекторов типа СНМ.

Минимальная ширина гелиевых детекторов типа СНМ 8 мм. Для разработанных детекторов минимальная ширина 5 мм и в теории ограничена только размером кремниевого фотоумножителя, для которого на данный момент минимальный размер равен 1x1 мм, что, в свою очередь, позволяет увеличить пространственное разрешение без увеличения расстояния образец-детектор.

При тестировании не происходила оценка пространственного разрешения сцинтилляционных детекторов, так как оно зависит от многих параметров для времяпролетной методики, в частности ширина протонной вспышки, расстояние мишень-образец-детектор, угла и коллиматорной системы и должно определяться комплексно для каждой установки и типа детекторной системы.

3.3 Результаты тестирования позиционно-чувствительных детекторов

В качестве установки для тестирования была собрана схема, изображенная на рисунке 67. В качестве источника нейтронов использовался ^{252}Cf после которого расположен замедлитель нейтронов толщиной 100 мм, заполненный тяжелой водой D_2O . Детектор расположен на линейной подвижке Zaber LHM100A-T3A с ходом 100мм, которая перемещает детектор вдоль пучка. После замедлителя расположена комбинированная защита толщиной 5 см состоящая из слоев кадмия и слоев свинца со щелью размером 2 мм x 20 мм. Общая толщина кадмия около 2 см, свинца 3 см. Расстояние источник нейтронов - детектор 30 см. Детектор расположен на расстоянии около 3 мм от щели. Дополнительно для защиты от рассеянного излучения детектор и система перемещения были закрыты со всех сторон свинцовыми кирпичами толщиной 30 мм перед которыми расположены листы кадмия толщиной 2 мм. Сигналы полученные с SiPM попадают на предусилитель-дискриминатор, сигналы с которого анализируются и сохраняются диджитайзером Caen DT5720.

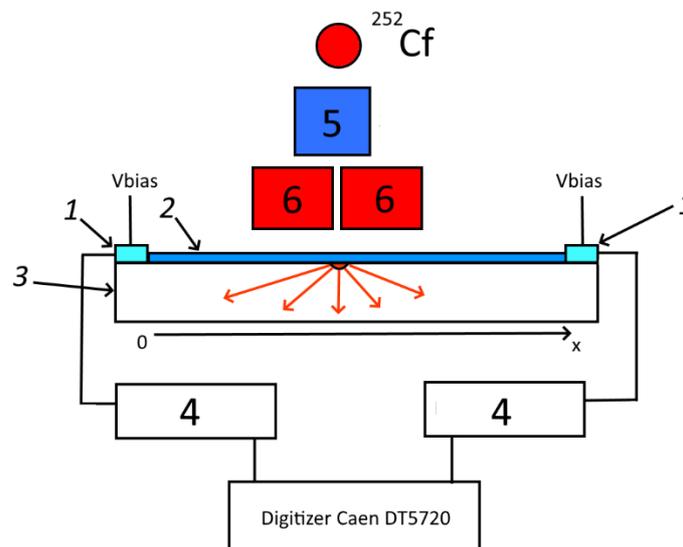


Рисунок 67 – Блок схема установки для тестирования: 1 -SiPM, 2 – Сцинтиллятор, 3- Световод, 4 – Предусилитель, 5 – Замедлитель D_2O , 6 – Комбинированная щель из свинца и кадмия

Дополнительно была написана программа для автоматизации эксперимента, которая сохраняла данные с диджитайзера и после сбора необходимой статистики перемещала детектор на 1 мм до тех пор, пока не будет пройден весь чувствительный объём детектора. Программа имеет функцию установки минимального и максимального порога для отсеивания теплового шума и записи сигнала только если произошла регистрация одновременно с 2-х SiPM.

3.3.1 Линейный позиционно-чувствительный детектор

Первым был протестирован детектор на основе SiPM фирмы Sensl с диффузным отражателем. В качестве предусилителя использована схема, описанная ранее. Аналоговый сигнал снимался сразу после зарядо-чувствительного усилителя. Напряжение питания SiPM 33,1 В, количество измерений на точку 1000 шт. На графике в качестве амплитуды отображена средняя амплитуда (пиковое значение) в точке за 1000 измерений. Результаты обработки данных (отношение амплитуд) с двух SiPM показаны на рисунке 68.

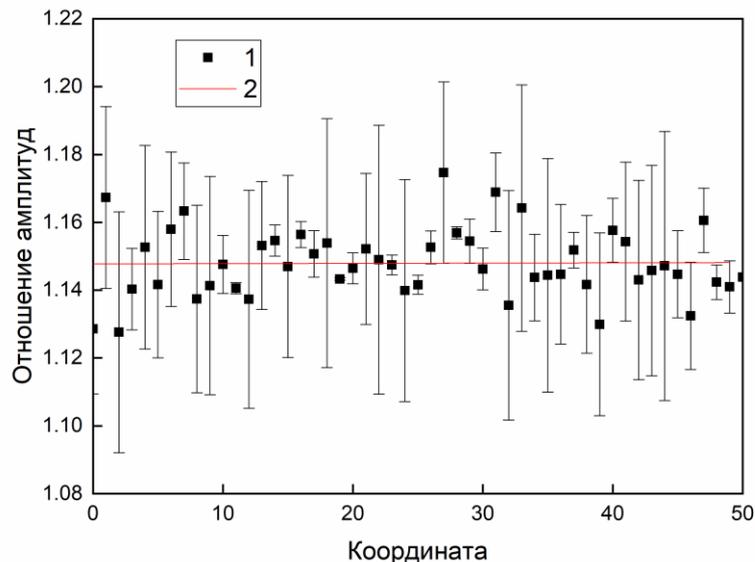


Рисунок 68 – Отношение средних амплитуд (пиковое значение) в точке за 1000 событий: 1 – Экспериментальные данные, 2- Аппроксимация

Из результатов измерений в этом эксперименте не удалось получить зависимость амплитуды от положения. Предполагаем, что это связано с низким количеством ячеек кремниевого фотоумножителя. В связи с этим не стали проводить измерения детектора без покрытия фторопластовой лентой и перешли к тестированию детектора на основе SiPM от Hamamatsu.

Для тестирования детектора на основе SiPM Hamamatsu потребовало модификации предусилителя, т. к. параметры SiPM отличаются от используемого ранее SiPM фирмы Sensl. В частности, он имеет меньшее усиление и требует большего питающего напряжения. Модифицированный предусилитель рассчитан на питающее напряжение до 80 В и имеет большой коэффициент усиления.

В первую очередь было проведено измерение детектора с диффузионным отражателем, количество измерений на точку 5000. Результаты измерения показаны на рисунке 69.

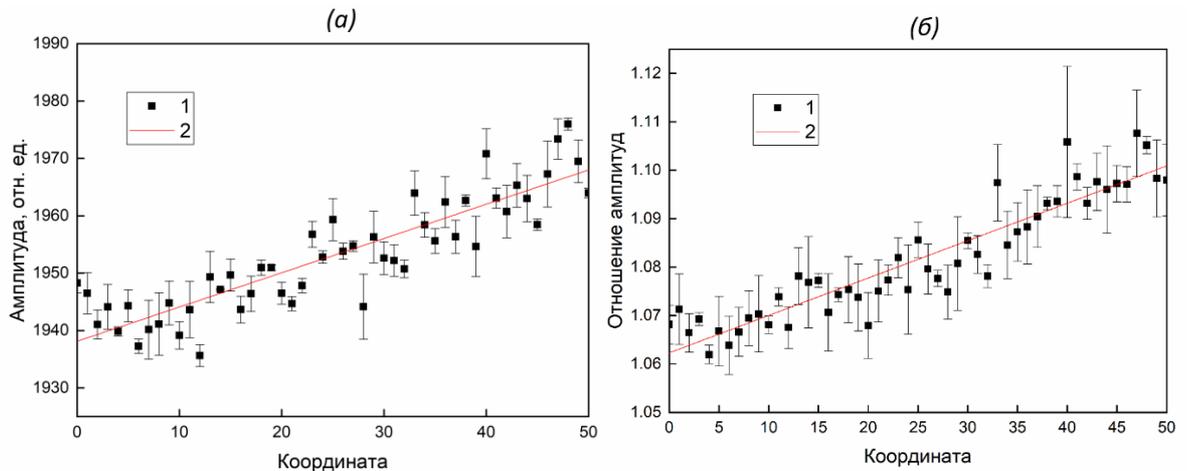


Рисунок 69 – (а) – Средняя амплитуда с правого SiPM, (б) - Отношение амплитуд: 1 – Экспериментальные данные, 2- Аппроксимация

Как видно из результатов измерений, форма затухания фотонов в световоде имеет линейный характер и отслеживается зависимость амплитуды от координаты, которая описывается линейной функцией. В общем виде, затухание фотонов в объёме световода описывается Законом Бугера — Ламберта — Бера, который описывается формулой

$$I=I_0e^{-kl}, \quad (7)$$

,где I - интенсивность света, прошедшего слой вещества толщиной I_0 -интенсивность света на входе в вещество, k - показатель поглощения .

Как видно из формулы, затухание света в веществе происходит по экспоненциальному закону и не учитывает отражения от стенок световода. Линейная форма зависимости, полученной из экспериментальных данных, позволяет судить, что на данной длине световода затухание не сильно выражено. Это позволяет предположить, что возможно увеличить длину детектора. Разрешение по координате в данном образце детектора примерно 10 мм [17].

Далее были проведены измерения детектора без диффузионного отражателя. Результаты измерения показаны на рисунке 70. По результатам измерения видно, что детектор имеет большее затухание и форма приближается к экспоненциальной, однако имеет линейный характер на начальной части (рисунок 70 а, б). За счет большего затухания данный детектор имеет большее разрешение (примерно 5мм).

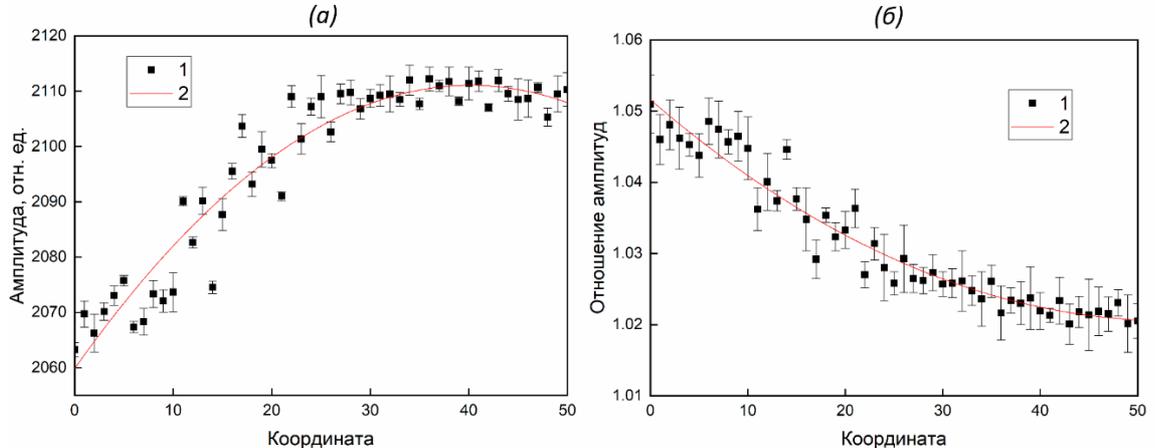


Рисунок 70 – (а) – Средняя амплитуда с правого SiPM, (б) - Отношение амплитуд, 1 – Экспериментальные данные, 2- Аппроксимация

Из проведенных измерений можно сделать вывод, что возможно получать координату в подобного типа детекторов только на анализе амплитудной характеристики с двух SiPM, что в свою очередь позволяет создавать дешевые одномерные ПЧД. Хотя подобные ПЧД не позволяют получить высокую разрешающую способность, но позволяют получать дополнительную информацию

при проведении нейтронных экспериментов, например информацию о текстуре образца. Возможность получения координаты в первую очередь зависит от количества ячеек кремниевого фотоумножителя. Пространственное разрешение детектора в нашем случае ограничено шириной детектора (5 мм) и сильно зависит от типа отражающей поверхности световода. Это позволяет сделать вывод, что подбором материалов, ширины световода и типа покрытия позволяет менять параметры подобных детекторов. Минимально-возможная толщина световода в подобного типа детекторов ограничена размерами SiPM (1мм) и является одним из ограничений по минимальному пространственному разрешению.

3.3.2 Двухмерный позиционно-чувствительный детектор

Для тестирования 2Д-ПЧД использована схема, описанная выше, только измерения происходили по диагонали детектора. Дополнительно было проведено моделирование конструкции исследованного детектора. Параметры моделирования описаны в главе 2.2.1 На рисунке 71 показаны сравнение модельных и экспериментальных данных [18].

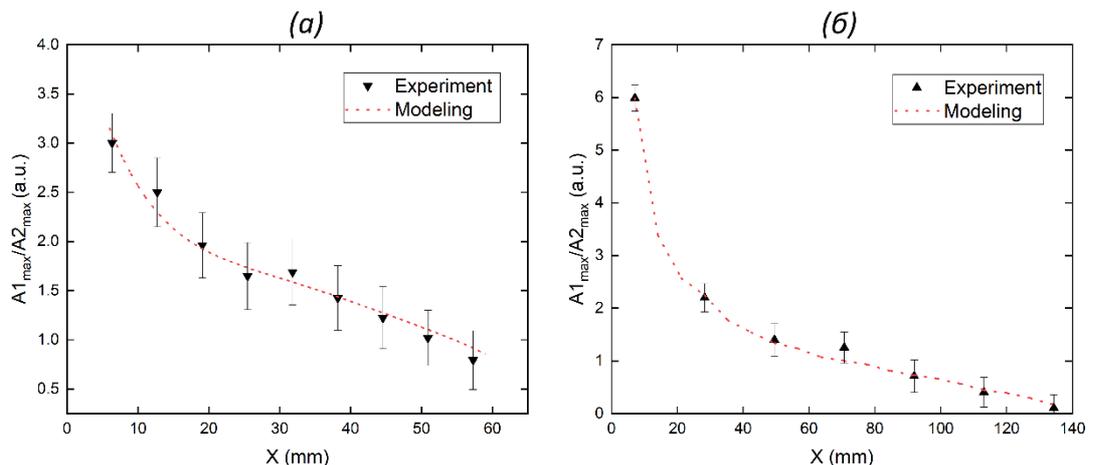


Рисунок 71 – Сравнение экспериментальных спектров и модельных с двух противоположных кремниевых фотоумножителей: (а) - 50 мм, (б) - 100 мм

Из экспериментальных данных можно сделать вывод, что полученные значения совпадают с модельными данными. Это означает, что смоделированной оптической части достаточно для определения основных параметров детекторов, и

предложенный метод позволяет определять координату в двухмерном ПЧД детекторе.

В результате оценки, разрешение по координате для 50 мм детектора составляет около 10 мм, для 100 мм детектора — около 7 мм. Оценка разрешения основывалась на расчете абсолютной ошибки определения амплитуды и расчета ошибки определения координаты от аппроксимирующей кривой для каждой точки по координате. Среднее значение этой величины считали оценкой разрешения детектора. Разница в разрешении связана с большей площадью световода, в котором происходит более сильное затухание света, и, следовательно, более сильное различие амплитуд сигналов на торцах детектора. Так же в погрешность определения разрешения вносит вклад размер отверстия в кадмии и точность его позиционирования относительно световода.

Так как метод определения координаты зависит от затухания фотонов в объеме и при отражении от поверхностей, варьируя коэффициент пропускания световода и параметры диффузно-отражающей поверхности, возможно провести оптимизацию параметров и улучшить координатное разрешение при различных размерах детектора.

В данной работе разрешение оценивалось только по разнице амплитуд двух противоположных кремниевых фотоумножителей. Анализ координаты при использовании оставшихся 2 кремниевых фотоумножителей не проводилась. Для получения пространственной координаты, требуется анализ 4 сигналов, получаемых с кремниевых фотоумножителей.

ГЛАВА 4. Многофункциональный дифрактометр “СФЕРА”

4.1 Назначение дифрактометра “СФЕРА”

Дифрактометр “СФЕРА” предназначен для исследований фазового состава и структуры поликристаллических образцов. Конструкция дифрактометра основана на кольцевых детекторах нейтронов. Независимая регистрация сигнала с каждого детектора и расположение детекторов по кольцу относительно образца позволяет проводить определение текстуры различных образцов. Также в случае, если определение текстуры не требуется, кольцевые детекторы позволят увеличить телесный угол захвата нейтронов и значительно уменьшить время проведения эксперимента.

Основные требования к детекторам:

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

Основу дифрактометра составляют детекторы, описанные в главе 2.1. Разработанный дифрактометр будет размещаться на источнике ИН-06 ИЯИ РАН.

4.2 Детекторы используемые в дифрактометре “СФЕРА”

Основу дифрактометра составляют многослойные сцинтилляционные детекторы нейтронов. Как описано в главе 3.2, в подобных детекторах эффективность напрямую зависит от количества слоев. Для оценки параметров эффективности регистрации тепловых нейтронов проведено моделирование и сравнение двухслойного и трехслойного детектора [89]. Из результатов

моделирования показано увеличение эффективности (около 13%) при увеличении количества слоев до 3х. Для дифрактометра специально разработан вариант детекторов, который состоит из трех слоев сцинтиллятора. Схема разработанного детектора представлена на рисунке 72.

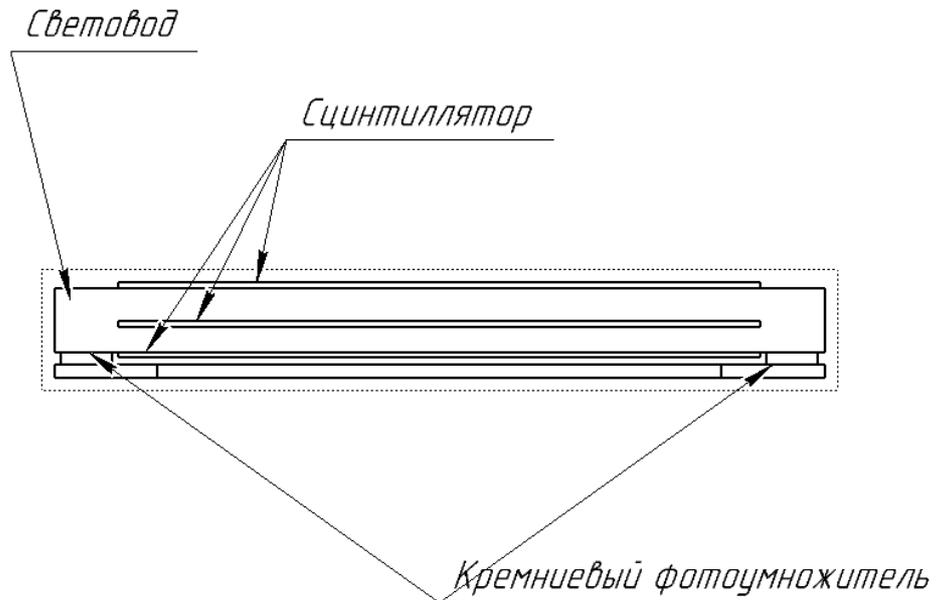


Рисунок 72 – Схема трехслойного детектора

Для изготовления световода использовался материал PLEXIGLAS XT толщиной 5мм, из которого вырезался цилиндр размером 5х4х60мм с вырезом по центру световода размером 0.5х50мм для размещения третьего слоя сцинтиллятора. После изготовления заготовки, производилось изготовление линзы типа “рыбий глаз” фрезерный станком с шаровой фрезой диаметром 4мм. Внешний вид световода представлен на рисунке 73.



Рисунок 73 – Внешний вид световода

После финишной сборки детектор покрывался непрозрачной термоусадочной пленкой для защиты от внешнего освещения. На рисунке 74 показан внешний вид детекторов, размещённых на кольце.



Рисунок 74 – Внешний вид нейтронных детекторов

Так как детекторы достаточно чувствительны к внешнему освещению, после монтажа на кольцо дифрактометра, детекторы дополнительно покрывались черным герметиком в торцах и местах вывода проводов.

4.3 Конфигурация разработанного дифрактометра

Исходя из результатов моделирования [89], была выбрана конфигурация, состоящая из 7 колец, расположенных на углах 150-120-105-90-75-60-20 градусов. На рисунке 75 показана принципиальная схема размещения колец относительно образца. Образец размещается в центре сферы.

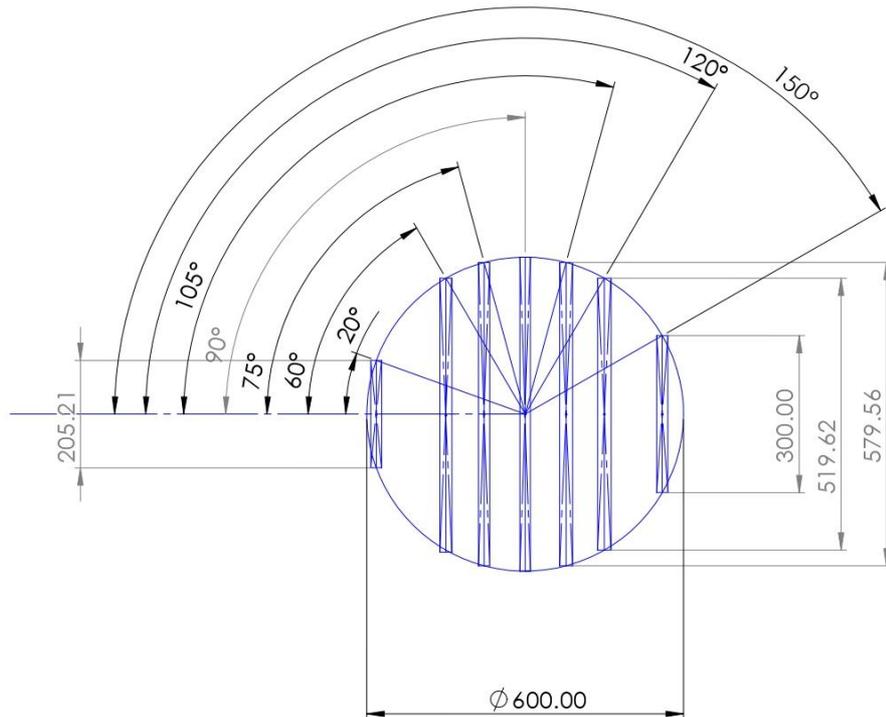


Рисунок 75 – Чертеж конфигурации дифрактометра “Сфера”

На основе этих данных была разработана эскизная модель дифрактометра состоящая из 7 колец. Внешний вид дифрактометра представлен на рисунке 76.

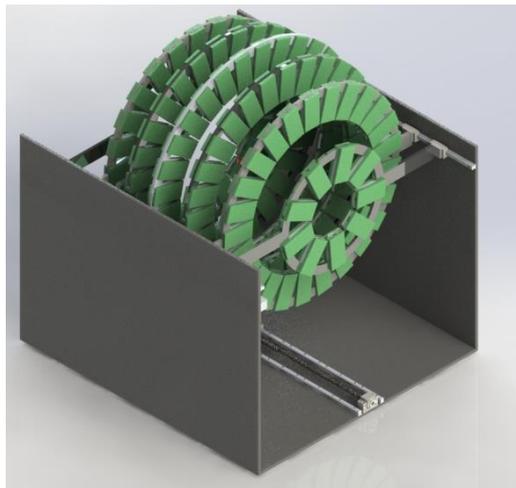


Рисунок 76 – Внешний вид эскизного проекта дифрактометра “СФЕРА”

Также проведено моделирование параметров и оценка разрешения разрабатываемого дифрактометра.

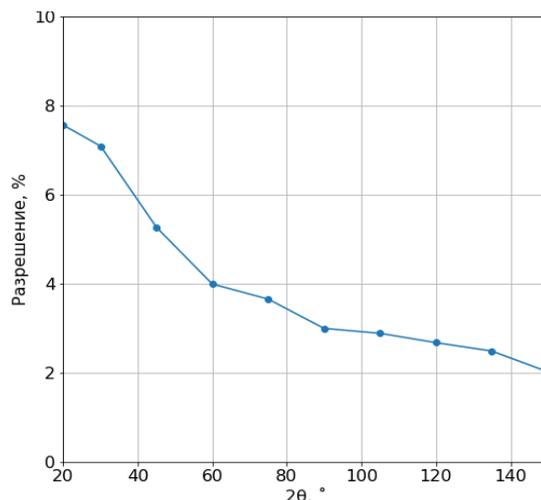


Рисунок 77 — Разрешающая способность нейтронного счетчика как функция угла рассеяния ($30^\circ < 2\theta < 150^\circ$)

На рисунке 77 представлена разрешающая способность детектора в дифракционном эксперименте. Она варьируется от 2.0% до 7.6% в зависимости от угла рассеяния регистрируемых нейтронов. Из графика видно, что на малых углах для счетчиков на угле рассеяния 30° наблюдается падение разрешения.

Одним из способов улучшения разрешения установки является увеличение расстояния образец-детектор. В разработанном эскизном проекте была предусмотрена возможность перемещения кольцевых модулей блока детекторов. В этом случае, при удалении колец от образца, уменьшаются угловые размеры как детектора, так и образца. Таким образом, увеличив длину хода колец, становится возможной исходную конфигурацию “Сферы”, можно привести к виду “конуса”. На рисунке 78 приведен пример конфигурации детектора, в которой кольцевой детектор, регистрирующий рассеяние под углом 30° вынесен за исходную сферическую поверхность ($R_1=30$ см), образуя “конус” повышенного разрешения на расстоянии $R_2=50$ см от образца [89]. В этом случае уширение пиков времяпролетного спектра уменьшается на 1%, позволяя добиться разрешающей способности в 6.6% [89].

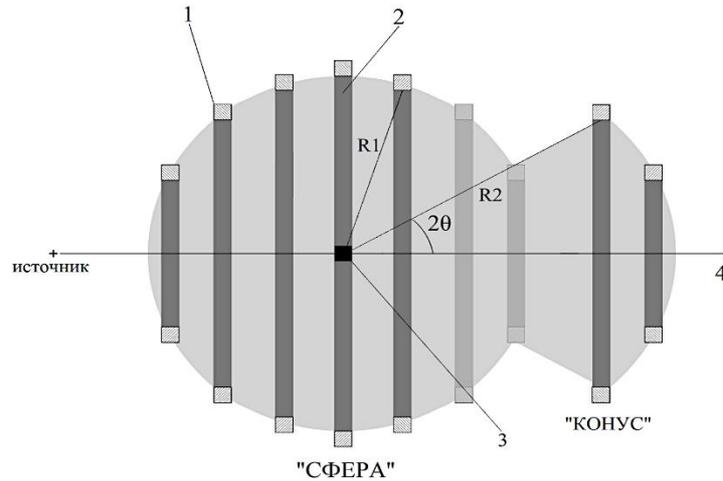


Рисунок 78 — Схема блока детекторов в конфигурации с кольцевыми детекторами под углом 30° с увеличенным до 50 см расстоянием образец-детектор [89] : 1 - образец, 2 - кольцо детектора, 3 - кольцевой нейтронный детектор, 4 - ось пучка

Итоговая разработанная конфигурация дифрактометра с учетом параметров, полученных моделированием показана на рисунке 79.

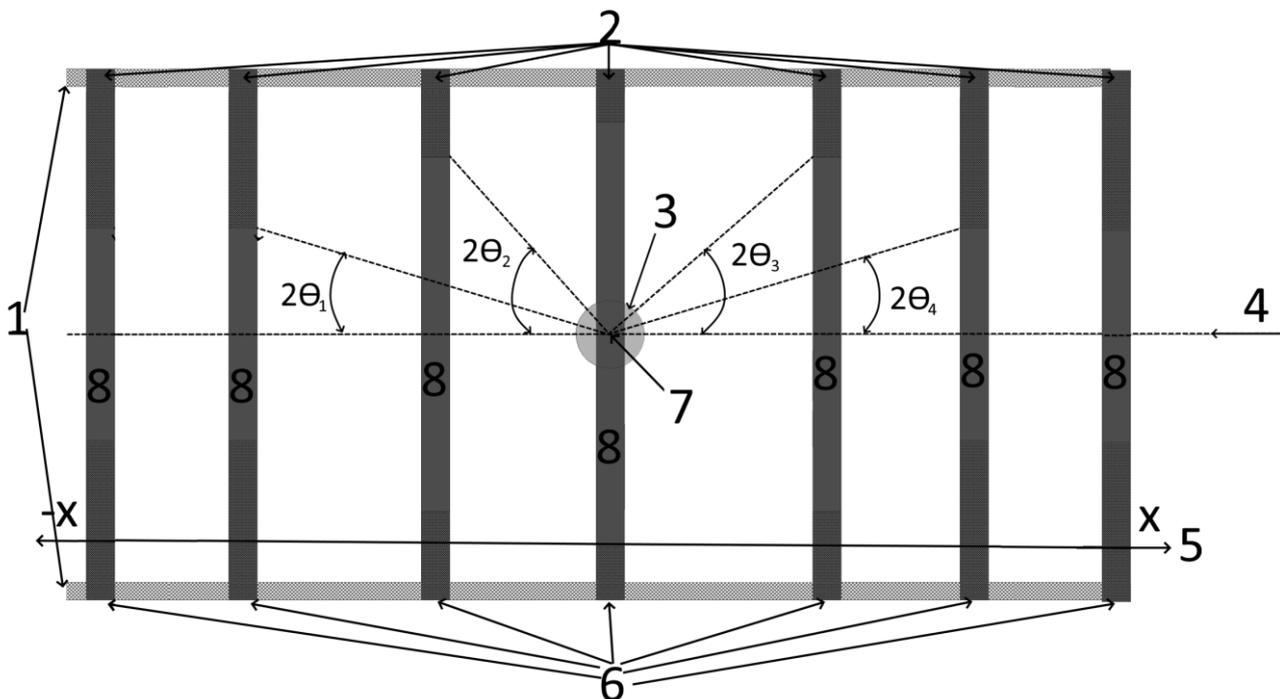


Рисунок 79 – Блок схема разработанного дифрактометра

Дифрактометр состоит из 7(8) независимых колец диаметром от 300 до 600 мм, расположенных на каретках (6), закреплённых на рельсовых направляющих (1). Кольца приводятся в движение шаговым двигателем (7). Принцип работы дифрактометра: нейтроны (4) падают на образец (7), расположенному по центру среднего кольца на столе образца (3). Падающие нейтроны рассеиваются под различными углами. Перемещая кольца вдоль оси X (5), меняя расстояние, образец-детектор может настраивать подающие углы и варьировать разрешение. Общее количество детекторов, расположенных на кольце 156 шт. Расстояние 1 кольцо-7 кольцо 1900 мм. Угловой диапазон 6° - 174° . На данную схему дифрактометра получен патент [24].

4.4 Электроника дифрактометра “СФЕРА”

Электронная схема управления дифрактометром состоит из нескольких частей и представлена на рисунке 80.

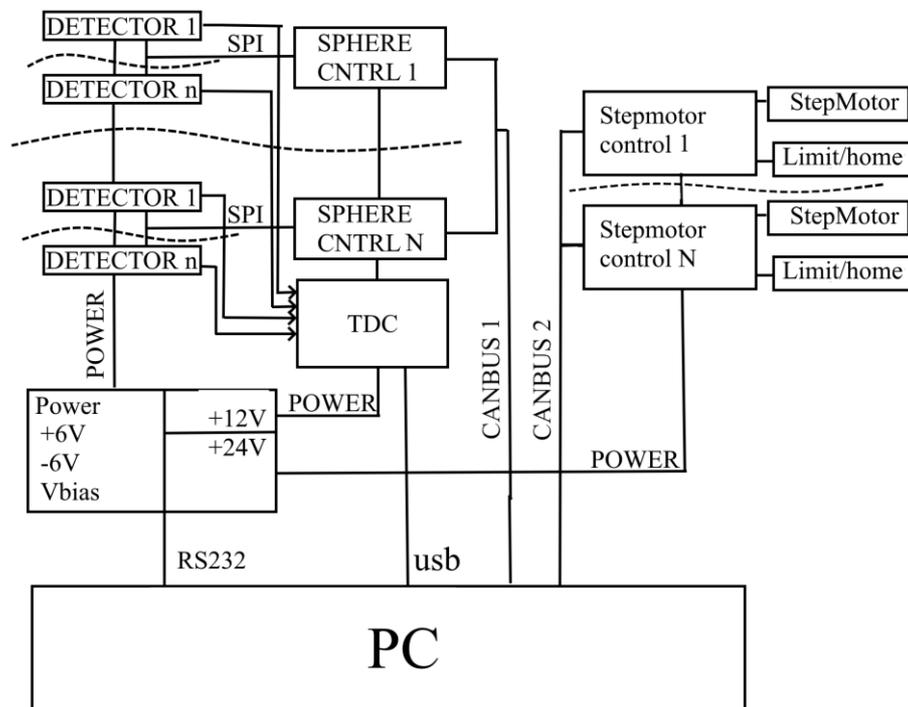


Рисунок 80 – Блок-схема электроники дифрактометра “СФЕРА”

- 1) Предусилитель.

В качестве предусилителей используется модификация схемы, описанная в главе 2.1.3. В новой версии предусилителя добавлено цифровое управление порогом дискриминатора на основе цифрового резистора. Также изменен формат платы для компактного размещения в корпусе кольца. На рисунке 81 представлен внешний вид предусилителя и пример размещения на кольце дифрактометра.

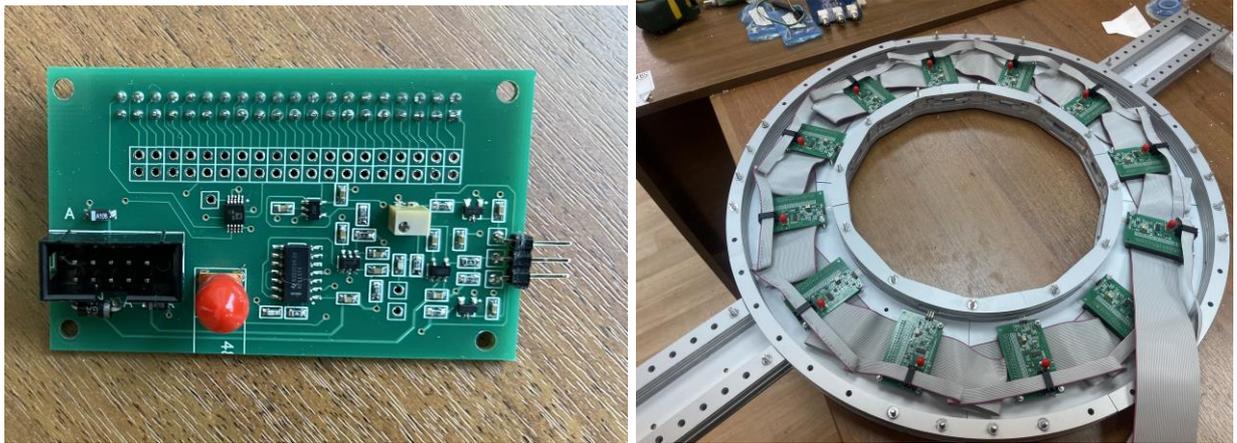


Рисунок 81 - Внешний вид предусилителя

Цифровое управление порогом осуществляется по шине SPI, детекторы одного кольца соединены параллельно. Для управления порогом разработано устройство управления порогом кольца, которое принимает по шине CAN-BUS номер предусилителя и записывает значение в память цифрового резистора [26].

2) Время цифровой преобразователь.

2) Разработанный ВЦП основан на описанном ранее в главе 2.1.4. ВЦП имеет 160 каналов для детекторов и 1 канал синхроимпульса, который задает стартовый импульс для начала отсчета. ВЦП основан на микросхеме ПЛИС Xilinx Kintex-7 и подключается по USB к ПК. Для унификации ВЦП может работать как во времяпролетном режиме, так и в режиме измерения монохроматического излучения, где требуется считать импульсы.

3) Система перемещения

Для управления системой перемещения используются 7 контроллеров шаговых двигателей с интерфейсом CANBUS. Каждое кольцо имеет независимый

двигатель, а также систему концевых выключателей, которые определяют начальное положение кольца, а также защищают от соударения колец при перемещении. На рисунке 82 представлен внешний вид системы перемещения колец дифрактометра “СФЕРА”.



Рисунок 82 – Внешний вид системы перемещения

4.5 Тестирование и калибровка детекторов

Внешний вид дифрактометра “СФЕРА” представлен на рисунке 83.



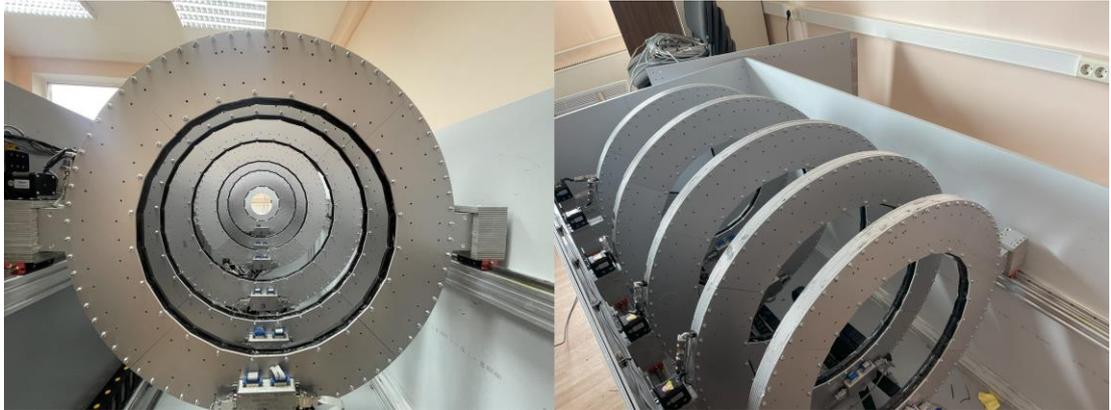


Рисунок 83 - внешний вид изготовленного дифрактометра

После сборки необходимо проверить ряд параметров собранного дифрактометра. В частности, необходимо откалибровать параметры предусилителей и одиночных детекторов.

Калибровка параметров предусилителей осуществлялась регулированием порога каждого предусилителя для достижения темнового счета не более 1 импульса в минуту.

Для текстурных измерений необходимо, чтобы детекторы, расположенные на одном кольце, имели максимально близкие параметры эффективности. За счет неоднородности сцинтиллятора и возможных погрешностей при изготовлении детекторов, изготовленные детекторы будут иметь пусть близкие, но неодинаковые параметры. Для устранения неоднородности необходимо провести измерение счета от источника нейтронов и расчета калибровочных констант.

Для дифрактометра “СФЕРА” калибровка детекторов проводилась следующим образом. По центру среднего кольца располагался источник нейтронов ^{252}Cf и проводилось накопление счета детекторов за 10 минут. На основе данных счета, полученных с одного кольца, рассчитывались калибровочные коэффициенты каждого детектора. Неоднородность в счете детекторов дифрактометра “СФЕРА” составляет от 2% до 11.6%.

В результате тестирования так же определены механические параметры:
 - Точность по оси- 100 мкм;

- Параллельность кольца относительно оси пучка – 200 мкм;
- Расстояние 1 кольцо-7 кольцо – 1900 мм;
- Диапазон углов: 6-174 градуса;

4.6 Выводы

Разработан и протестирован многофункциональный дифрактометр “СФЕРА” с возможностью захвата нейтронов в диапазоне углов от 6 до 174 градуса. За счет размещения детекторов на кольце по радиусу становится возможно определения текстуры образца. Если определение текстуры не требуется, возможно суммировать показания детекторов с одного кольца, тем самым увеличивая телесный угол захвата нейтронов и уменьшая время проведения эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и изготовлена многофункциональная экспериментальная установка “СФЕРА” для дифракционных исследований на монохроматическом и времяпролетном нейтронном пучке. Установка имеет в своем составе 156 высокоэффективных сцинтилляционных детекторов нейтронов. За счет расположения детекторов по кольцу установка позволяет определять текстуру образца. В случае, если определение текстуры не требуется, возможно проводить суммирование показаний с одного кольца, что позволяет уменьшить время эксперимента. За счет возможности широких возможностей по варьированию угла, разрешения и возможности суммирования данных с одного кольца возможно перспективное использование данной установки на компактных источниках нейтронов.

2. Разработана система считывания сигналов с детекторов нейтронов для времяпролетных измерений с функцией накопления гистограмм и шириной временного окна от 10 нс до 12.5 мкс. Разработка данной системы позволила снизить мертвое время во время чтения данных и расширить функциональные возможности проведения эксперимента. Данная система в различных модификациях установлена и используется на установках “ТЕРКУЛЕС”, “КРИСТАЛ” и “СФЕРА”.

3. Разработаны линейные сцинтилляционные детекторы тепловых нейтронов на основе пластикового прозрачного световода и кремниевых фотоумножителей. На основе прототипа были созданы детекторы различных размеров и эффективности. При использовании в детекторе двух слоев сцинтиллятора с высокой концентрацией лития возможно получение детектора с эффективностью регистрации нейтронов до 70% (для нейтронов 1.9А). Отказ от использования WLS позволяет упростить конструкцию и увеличить эффективность сбора фотонов. Проведено прямое сравнение с детекторами на основе световода из WLS, и показано, что использование PMMA увеличивает общее количество фотонов в торцах световода.

4. Проведено моделирование оптических параметров детекторов подобного типа. Показано, что минимальное поглощение фотонов в объёме световода достигается при использовании диффузного отражающего покрытия. Из результатов моделирования получены геометрические ограничения на размеры детектора (длина от 1 до 250 мм). Показано, что при использовании прозрачного световода возможно достижение высокого световыхода. Проведено тестирование разработанных прототипов детекторов на импульсном источнике ИН-06 и РАДЭКС ИЯИ РАН с использованием тестовых образцов. В качестве образцов использовались как тестовые образцы синтетического алмаза и ванадия, так и реальные образцы различных жаропрочных сплавов. Показана возможность использования детекторов в реальных дифракционных экспериментах.

5. Разработан и впервые применен метод согласования размеров фотоприёмника и световода на основе использования сверхширокоугольной линзы с целенаправленно увеличенной дисторсией. Проведено моделирование параметров сбора фотонов сверхширокоугольной линзой с целенаправленно увеличенной дисторсией. Из результатов моделирования видно, что использование линзы не приводит к изменению количества фотонов на активной части кремниевого фотоумножителя. По результатам моделирования разработана полезная модель, использующая данный тип линзы для сбора фотонов и позволяющая создавать кольцевые сцинтилляционные детекторы нейтронов с отсутствием слепых зон.

6. Созданы различные варианты электроники для детекторов, устраняющие влияние теплового шума и фонового гамма-излучения при использовании детекторов в установках для дифракционных экспериментов. В результате оптимизации параметров электроники разработан и впервые применен метод увеличения нагрузочной способности кремниевых фотоумножителей, основанный на ускоренной компенсации емкости, который позволяет увеличить нагрузочную способность в 2.7 раза.

7. Проведено моделирование и разработаны несколько вариантов позиционно-чувствительных детекторов. Показано применение метода определения координат на основе анализа амплитуды в сцинтилляционных детекторах тепловых нейтронов с пластиковым световодом и детекторами фотонов на основе кремниевого фотоумножителя. Впервые проведены измерения параметров подобного типа детекторов. Определено координатное разрешение, которое составляет 5-10 мм для одномерного детектора и 7-10 для двумерного детектора. Показано влияние параметров отражающего покрытия на координатное разрешение.

В заключение хотел выразить благодарность моему научному руководителю Р. А. Садыкову, а также Э. А. Коптелову, В. Н. Марину, С. Н. Аксенову, В.С. Литвину, руководству ИЯИ РАН, а также всем моим коллегам, которые помогли мне в исследованиях.

Также хотел бы поблагодарить Микерова В. И. за проявленный интерес к работе, ценные замечания и советы, высказанные при подготовке текста диссертации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов В. Л. Нейтронная физика на пороге XXI века // Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2000. — Т. 31, вып. 6. — С. 1303–1342.
2. Pintschovius L. Neutrons Versus X-Rays // Series E: Applied Sciences (2012), vol 216, pp 577-580
3. Wang Z., Liu Y., Zhang Z. Handbook of Nanophase and Nanostructured Materials. X-ray and Neutron Scattering. // 2002, Springer, Boston, MA., pp. 344—371.
4. Shu F, Ramakrishnan V, Schoenborn BP. Enhanced visibility of hydrogen atoms by neutron crystallography on fully deuterated myoglobin // Proc Natl Acad Sci U S A. 2000;97(8):3872-3877.
5. C. Vettier, MAGNETIC SCATTERING: X-RAYS AND NEUTRONS // European School on Magnetism Constanta. 7-16 September 2005, IV-3, pp. 2
5. J. Baruchel, X-ray and neutron topographical studies of magnetic materials // Physica B: Condensed Matter, Volume 192, Issues 1–2, 1993, Pages 79-93.
7. LaManna, Jacob & Hussey, Daniel & Baltic, E. & Jacobson, D. (2017). Neutron and X-ray Tomography (NeXT) system for simultaneous, dual modality tomography. Review of Scientific Instruments. 88. 113702. 10.1063/1.4989642.
8. Нейтронная рефлектометрия в России: текущее состояние и перспективы / В. И. Боднарчук, А. П. Булкин, Е. А. Кравцов [и др.] // Кристаллография. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 57-71. – DOI 10.31857/S0023476122010040.
9. Ковальчук, М. В. Исследовательский реактор ПИК / М. В. Ковальчук, С. Л. Смольский, К. А. Коноплев // Кристаллография. – 2021. – Т. 66. – № 2. – С. 184-190. – DOI 10.31857/S0023476121020053
10. T. M. Persons and G. Aloise, Technology Assessment: Neutron Detectors: Alternatives to Using Helium-3, // U.S. Government Accountability Office, 2011, GAO-11-753.
11. A. Stoykov, J. Mosset and M. Hildebrandt, Trigger Efficiency of a ZnS:6LiF Scintillation Neutron Detector Readout with a SiPM // in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 63, no. 4, pp. 2271-2277, Aug. 2016.

12. В. Н. Марин, Р. А. Садыков, Д.Н. Трунов и др., Новый тип сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на основе ZnS (Ag)/LiF и лавинных фотодиодов // Письма в Журнал технической физики. 2015. Т. 41. № 18. С. 96-101.
13. Литвин В.С., Марин В. Н., Трунов Д.Н., и др. Сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе твердотельных фотоумножителей и световодов. // КРИСТАЛЛОГРАФИЯ, том 61, номер 1, 2016 г., С. 115-119.
14. Марин В.Н., Садыков Р.А., Трунов Д.Н. и др., Кольцевой детектор нейтронов для времяпролетного дифрактометра, состоящий из линейных сцинтилляционных детекторов на основе кремниевых фотоумножителей, // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 1. С. 5-12.
15. Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Р. А. Садыков и др., Многослойный высокоэффективный сцинтилляционный счетчик нейтронов на основе SiPM и органического световода // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2022. – № 10. – С. 10-15. – DOI 10.31857/S1028096022100168.
16. Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Р. А. Садыков и др., Моделирование оптических параметров сцинтилляционных позиционно-чувствительных детекторов с органическим световодом // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 4. – С. 71-76. – DOI 10.31857/S1028096023040209.
17. Glushkova, T.I., Trunov, D.N., Marin, V.N. *et al.* Prototype of Position-Sensitive Scintillation Neutron Detector Based on SiPM and ZnS: Li⁶. *J. Surf. Investig.* **17**, 130–134 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1027451023010093>
18. Д.Н. Трунов, В.Н. Марин, Т. Глушкова [и др.]. Исследования прототипа позиционно-чувствительного детектора нейтронов на основе кремниевых фотоумножителей // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №12 (138). DOI: 10.23670/IRJ.2023.138.23

19. Трунов Д.Н. Исследование жаропрочных объемных композитов MoTiC и MoTiC-W / Д.Н. Трунов, С.Н. Аксенов, В.С. Литвин [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — №10 (136). — URL: <https://research-journal.org/archive/10-136-2023-october/10.23670/IRJ.2023.136.2> (дата обращения: 10.11.2023). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.136.2
20. Трунов Д.Н. Многофункциональный дифрактометр СФЕРА / Д.Н. Трунов, В.Н. Марин, С.Н. Аксенов [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — №1 (139). — URL: <https://research-journal.org/archive/1-139-2024-january/10.23670/IRJ.2024.139.29> (дата обращения: 02.02.2024). — DOI: 10.23670/IRJ.2024.139.29
21. В. Н. Марин, Р. А. Садыков Д. Н. Трунов и др., Новый тип сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на основе ZnS (Ag) /LiF и лавинных фотодиодах // Препринт ИЯИ РАН,1401/2015.
22. Патент на полезную модель № 177857 U1 Российская Федерация, МПК G01T 3/06. Кольцевой детектор тепловых нейтронов: № 2017143247: заявл. 11.12.2017: опубл. 14.03.2018 / В. Н. Марин, Р. А. Садыков, В. С. Литвин [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
23. Патент № 2782417 C1 Российская Федерация, МПК G01T 1/208. Устройство для регистрации излучения: № 2022105038: заявл. 25.11.2021: опубл. 26.10.2022 / Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Е. В. Алтынбаев; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение "Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт".
24. Патент № 2796123 C1 Российская Федерация, МПК G01N 23/20. Широкодиапазонный кольцевой времяпролетный дифрактометр нейтронов с регулируемым разрешением: № 2022134286: заявл. 26.12.2022: опубл. 17.05.2023 / Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, В. С. Литвин [и др.] ; заявитель Федеральное

государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

25. Патент RU 2814061 C1 Российская Федерация, МПК G01T 1/202. Сцинтилляционный детектор нейтронного и гамма-излучения: № 2023118645: заявл. 13.07.2023: опубл. 21.02.2024/ Д. Н. Трунов, Е.В. Алтынбаев; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение "Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (НИЦ "Курчатовский институт" - ПИЯФ)

26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022664139 Российская Федерация. Программа модуля микроконтроллера для управления и настройки предусилителей детектора СФЕРА (Sphere detector control) : № 2022663133 : заявл. 12.07.2022: опубл. 25.07.2022 / Д. Н. Трунов; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022664140 Российская Федерация. Программа ПЛИС модуля для регистрации и накопления импульсов с детекторов ионизирующих излучений (Fast impulse counts 16): № 2022663134: заявл. 12.07.2022: опубл. 25.07.2022 / Д. Н. Трунов; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

28. Ковальчук М.В. Импульсный нейтронный источник на основе испарительно-скалывающей реакции на базе протонного синхротрона У-1.5 / М.В. Ковальчук, Н.Е. Тюрин, С.В. Иванов, А.П. Солдатов // Кристаллография. — 2022. — 5. — с. 795-800. DOI: 10.31857/S0023476122050101.

29. Кулевой Т.В. Компактный источник нейтронов DARIA / Т.В. Кулевой // Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2023: Сборник научных трудов IX Международной конференции; — Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2023. — с. 276.

30. Niechcial J Operational Costs of He3 Separation Using the Superfluidity of He4 / J Niechcial, P Banat, W Kempinski, Z Trybula // *Energies*. — 2020. — 13. DOI: 10.3390/en13226134.
31. Алексеев А.А., Садыков Р.А., Клементьев Е.С. и др. Спектры нейтронов прямых пучков экспериментальных каналов импульсного источника ИН-06 ИЯИ РАН // *Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования*. — 2015. — №3. — С. 5—10.
32. Calder S., An K., Boehler R. et al. A suite-level review of the neutron powder diffraction instruments at Oak Ridge National Laboratory // *Rev. Sci. Instrum.* — 2018. — Vol. 89. — 092701.
33. Schweika W., Violini N., Lieutenant K. et al. DREAM — a versatile powder diffractometer at the ESS // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2016. — Vol. 746. — 012013.
34. Stefanescu I., Christensen M., Hall-Wilton R. et al. Performance study of the Jalousie detector baseline design for the ESS thermal powder diffractometer HEIMDAL through GEANT4 simulations // *JINST*. — 2019. — Vol. 14. — 10020.
35. Козленко Д.П., Кичанов С.Е., Лукин Е.В., Савенко Б.Н. Нейтронные исследования кристаллической и магнитной структуры материалов при воздействии высокого давления на импульсном реакторе ИБР-2: современные возможности и перспективы // *Кристаллография*. — 2021. — Т. 66, №2. — С. 311—321.
36. Smith R.I., Hull S., Tucker M.G. et al. The upgraded Polaris powder diffractometer at the ISIS neutron source // *Rev. Sci. Instrum.* — 2019. — Vol. 90. — 115101.
37. Бушама, Л. Изучение свойств нейтронного детектора на основе ZnS(Ag)+6LiF для контроля радиационной обстановки вблизи ядерных объектов // *Ученые записки физического факультета Московского университета*. — 2018. — № 4. — С. 1840202.
38. Cieślak, Michał J.; Gamage, Kelum A.A.; Glover, Robert. Critical Review of Scintillating Crystals for Neutron Detection // *2019 Crystals* 9, no. 9: pp. 480.

39. Y. Yehuda-Zada, K. Pritchard, J.B. Ziegler, C. Cooksey, K. Siebein, M. Jackson, C. Hurlbut, Y. Kadmon, Y. Cohen, R.M. Ibberson, C.F. Majkrzak, N.C. Maliszewskyj, I. Orion, A. Osovizky, Optimization of $6\text{LiF}:\text{ZnS}(\text{Ag})$ scintillator light yield using GEANT4, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 892, 2018, Pages 59-69, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.02.099>.
40. Iwase, Hiroki & Katagiri, Masaki & Shibayama, Mitsuhiro. (2012). Optimization of the thickness of a $\text{ZnS}/(\text{LiF})\text{-Li-6}$ scintillator for a high-resolution detector installed on a focusing small-angle neutron scattering spectrometer (SANS-U). *Journal of Applied Crystallography*. 45. 10.1107/S0021889812008928.
41. Wu, C., Tang, B., et al. A study of $\text{ZnS}(\text{Ag})/6\text{LiF}$ with different mass ratios // *Radiation Measurements*, v. 58, p. 128–132. 2013
42. Кащук А.П., Левицкая О.В. // *Журнал технической физики*. 2020. Т.90. №.5
Doi: 10.21883/JTF.2020.05.49168.85-19.
43. Valentin V. Ustinov, Sergey V. Afanasiev, Vladimir A. Baskov, Vasil I. Bekirov, Dmitry K. Dryablov, Boris V. Dubinchik, L'vov A. I., Alexander I. Malakhov, Katerina Michalickova, Valery V. Polyansky, Dmitry G. Sakulin, Evgeny V. Sukhov; Multilayer neutron detector based on a plastic scintillator. *AIP Conf. Proc.* 24 September 2021; 2377 (1): 030018. <https://doi.org/10.1063/5.0063298>
44. Andersen, Ken & Carlile, Colin. (2016). A Proposal for a Next Generation European Neutron Source. *Journal of Physics: Conference Series*. 746. 012030. 10.1088/1742-6596/746/1/012030.
45. Pino, F., Stevanato, Luca et al., Study of the thermal neutron detector $\text{ZnS}(\text{Ag})/\text{LiF}$ response using digital pulse processing // *Journal of Instrumentation*. (2015). 10. T08005-T08005
46. Fischer, J., Radeka, V. & Boie, R. A. (1983). High position resolution and accuracy in ^3He two-dimensional thermal neutron PSDs. Position-sensitive detection of thermal neutrons, edited by P. Convert & J. B. Forsyth, pp. 129–140. London: Academic Press

47. David J. Loaiza, High-efficiency ^3He proportional counter for the detection of delayed neutrons, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 422, Issues 1–3, 1999, Pages 43-46, ISSN 0168-9002, [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01059-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01059-6).
48. Rodriguez-Carvajal, Juan. (1993). Recent Advances in Magnetic Structure Determination by Neutron Powder Diffraction. *Physica B: Condensed Matter*. 192. 55-69. [10.1016/0921-4526\(93\)90108-I](https://doi.org/10.1016/0921-4526(93)90108-I).
49. Characterisation of the Spatial Resolution and the Gamma-ray Discrimination of Helium-3 Proportional Counters/ Edoardo Rossi – 2020- [arXiv:1702.06501](https://arxiv.org/abs/1702.06501) [physics.ins-det]
50. G. J. Sykora, E. M. Schooneveld, N. J. Rhodes and L. Van Eijck, "Gamma sensitivity of a ZnS:Ag(6-LiF) wavelength shifting fiber neutron detector in mixed neutron-gamma fields, 2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC), Anaheim, CA, USA, 2012, pp. 1567-1571, doi: [10.1109/NSSMIC.2012.6551374](https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2012.6551374).
51. Mala Das, S. Seth, S. Saha, S. Bhattacharya, P. Bhattacharjee, Neutron-gamma discrimination by pulse analysis with superheated drop detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 622, Issue 1, 2010, Pages 196-199, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.361>.
52. Georg Ehlers, Athanasios Athanasiades, Liang Sun, Christopher S. Martin, Murari Regmi, Jeffrey L. Lacy, Performance tests of boron-coated straw detectors with thermal and cold neutron beams, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 953, 2020, 163238, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163238>.
53. Ю.Н. Харжеев, Сцинтилляционные счетчики в современных экспериментах по физике высоких энергий // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, 2015, т. 46, вып. 4, с. 1227-1320

54. Smith, R.; Stowell, J.P.; Barker, D.; Thompson, L.F. A Novel, Low-Cost, Position-Sensitive Neutron Detector to Support Thick-Target Inverse Kinematics Experiments for Nuclear Data Measurements. *Universe* 2023, 9, 274. <https://doi.org/10.3390/universe9060274>
55. Кащук, А. П. Позиционно-чувствительные детекторы тепловых и холодных нейтронов с газовым конвертором ^{32}He (обзор) / А. П. Кащук, О. В. Левицкая // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90, № 4. – С. 519-539. – DOI 10.21883/JTF.2020.04.49074.84-19. – EDN SLWTKO.
56. Nakamura T., Toh K., Kawasaki T., Ebine M., Birumachi A., Sakasai K., Soyama K. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2015. V. 784. P. 202-207. Doi: 10.1016/j.nima.2014.12.035
57. Morozov Andrey, Sena Marcos João, Margato L., Roulier D., Solovov, V. // *Journal of Instrumentation*. 2019. V.14. № 3. Doi:10.48550/arXiv.1902.04513
58. The SoLid collaboration. // *Journal of Instrumentation*. 2019. V. 14. №11. P.11003-11003. Doi:10.1088/1748-0221/14/11/P11003.
59. Yang Tian, Yidong Fu, Yulan Li, Yuanjing Li // 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC). 2017. C. 1-3. Doi:10.1109/NSSMIC.2017.8532612
60. J.D. Beal, K.D. Berry, R.A. Riedel, L.L. Funk, W.B. Reynolds, Y. Diawara, The NOMAD instrument neutron detector array at the SNS, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 1018, 2021, 165851, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.16585159278278>
61. Kharzheev, Yuri. (2017). Scintillation Detectors in Modern High Energy Physics Experiments and Prospect of Their use in Future Experiments. *Journal of Lasers, Optics & Photonics*. 04. 10.4172/2469-410X.1000148.

62. Д. М. Громушкин, Ф. А. Богданов, А. А. Лахонин [и др.] Низкофононый эндетектор для исследования нейтронной компоненты ШАЛ // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2018. – Т. 49. – № 1. – С. 78-84.
63. Tavernier, S. (2009). Detectors Based on Scintillation. In: Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00829-0_6
64. Г.А.Шелков, К.Шпиринг НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СВЕТОСБОРА В СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКАХ БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ. Сообщения объединённого института ядерных исследований, P13-80-84, 1980 г.
65. Фотоэлектронные умножители с многослойными пленочными экранами для защиты от воздействия внешних постоянных магнитных полей / А. Г. Батищев, К. Ф. Власик, С. С. Грабчиков [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1(4). – С. 16-23.
66. Hirotoshi Hayashida, Masayasu Takeda, Dai Yamazaki, Ryuji Maruyama, Kazuhiko Soyama, Masato Kubota, Tazuko Mizusawa, Noboru Yoshida, Yoshifumi Sakaguchi, Design and Demonstration of a Neutron Spin Flipper for a New Neutron Reflectometer SHARAKU at J-PARC, Physics Procedia, Volume 42, 2013, Pages 130-135, ISSN 1875-3892, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.186>.
67. Иванов, А. С. Нейтронная спектроскопия: основные принципы и приборное оснащение / А. С. Иванов, П. А. Алексеев // Кристаллография. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 21-40. – DOI 10.31857/S0023476122010076. – EDN FGIXGZ.
68. Иванов, И. Методика оценки и сравнения кремниевых фотоумножителей / И. Иванов // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2016. – № 2(152). – С. 62-77.
69. C. L. Wang, M. L. Crow, L. L. Funk, B. W. Hannan, J. P. Hodges and R. A. Riedel, "Optimizing ZnS/6LiF scintillators for wavelength-shifting-fiber neutron detectors," 2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), San Diego, CA, USA, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/NSSMIC.2015.7581839.
70. В. С. Литвин, А. А. Алексеев, Д. Н. Трунов и др., Нейтронная дифракция и спектрометрия на импульсном нейтронном источнике "РАДЭКС" ИЯИ РАН //

Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2019. – № 3. – С. 25-31. – DOI 10.1134/S0207352819030132.

71. E. A. Koptelov, Y. V. Ryabov, A. A. Alekseev et al., A complex of complementary pulsed neutron sources, neutron and radiographic nano-diagnostic instruments at the Institute for Nuclear Research RAS // *Journal of Physics: Conference Series* — 2011. – Vol. 291. — No 1. — P. 012012.

72. Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л. СРЕДСТВА РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСНОГО ВИДИМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ. Часть 2. Предварительная Обработка Сигналов Кремниевых Фотоэлектронных Умножителей. ОБЗОР // *Приборы и методы измерений*. 2013;(1):5-13.

73. Pino, F., Stevanato, Luca et al., Study of the thermal neutron detector ZnS (Ag)/LiF response using digital pulse processing // *Journal of Instrumentation*. (2015). 10. T08005-T08005.

75. В. Н. Марин, С. И. Поташев, Д. Н. Трунов [и др.], Система детектирования и накопления данных для времяпролетных нейтронографических установок // *Приборы и техника эксперимента*. — 2014. — № 6. — С. 37.

75. И. И. Левин, А. И. Дордопуло, И. А. Каляев, Ю. И. Доронченко, М. К. Раскладкин, Современные и перспективные высокопроизводительные вычислительные системы с реконфигурируемой архитектурой // *Вестн. ЮУрГУ. Сер. Выч. матем. информ.*, 4:3 (2015), с. 24-39

76. Lumsden, Mark & Robertson, J.L. & Yethiraj, Mohana. (2006). SPICE---Spectrometer and Instrument Control Environment // *Physica B-condensed Matter - PHYSICA B*. 385. 1336–1339.

77. E.H. Berkowitz, *Nuclear Instruments and Methods*, Volume 73, Issue 2, 1969, Pages 225-227, ISSN 0029-554X, [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(69\)90213-4](https://doi.org/10.1016/0029-554X(69)90213-4).

78. Stave S., Bliss M., Kouzes R., Lintereur A., Robinson S., Siciliano E., & Wood L. // *Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2015. V. 784. P. 208. **Doi:** 10.1016/j.nima.2015.01.039

79. Mengjiao Tang, Qian Yu, Chang Huang, Bin Tang, Zhijia Sun, Weijuan Zhao, Guangyou Wei, Xiaojie Cai, Xiuping Yue, and Shihui Zhou, Review of Scientific Instruments 93, 033305 (2022) Doi: 10.1063/5.0078183
80. Xie, S.; Zhu, Z.; Zhang, X.; Xie, Q.; Yu, H.; Zhang, Y.; Xu, J.; Peng, Q. Sensors 2021, 21, 4681. Doi: 10.3390/s21144681
81. Schuemann, J. (2014), Monte Carlo Calculations in Nuclear Medicine, Second Edition: Applications in Diagnostic Imaging. Med. Phys., 41: 047302. Doi: 10.1118/1.4869177
82. С.Ф. Сидоркин, Э.А. Коптелов Нейтронный комплекс ИЯИ РАН Импульсный источник нейтронов: идеология, история создания, возможности развития Препринт ИЯИ — 1280/2011 АПРЕЛЬ 2010, ISBN 978-5-94274-154-9
83. А. А. Алексеев, Р. А. Садыков, В. С. Литвин [и др.], Спектры нейтронов прямых пучков экспериментальных каналов импульсного источника ин-06 института ядерных исследований РАН // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2015. — № 3.-с. 5.
84. Сидоркин, С. Ф. Импульсный источник нейтронов ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2013. — № 6. — С. 97.
85. С. П. Кузнецов, В. С. Литвин, В. Н. Марин [и др.], Дифрактометр высокого разрешения на импульсном нейтронном источнике ин-06 ИЯИ РАН // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2018. — № 5. — С. 29-35.
86. Литвин В.С., Садыков Р.А., Трунов Д.Н., и др. Нейтронографические исследования кинетики упрочняющего отжига немагнитного сплава 40ХНЮ// Первый Российский кристаллографический конгресс "От конвергенции наук к природоподобным технологиям" 21–26 ноября 2016 г., Москва, Россия, Сборник тезисов, с. 352
87. S. Axenov, R. Sadykov, D. Trunov, Neutron Scattering Installation for In Situ High Pressure Studies // International Conference on Neutron Scattering 2017 (ICNS 2017),

Daejeon, the Republic of Korea, July 9 to 13, 2017. WeP 53, p167 Spectrometer and Instrument Control Environment // Physica B-condensed Matter - PHYSICA B. 385. 1336–1339.

88. Setsuo Satoh, Fiber multilayered ZnS position-sensitive neutron detector with high detection efficiency, Physica B: Condensed Matter, Volume 551, 2018, Pages 401-404, ISSN 0921-4526, <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.03.011>

89. Моделирование эффективности и разрешения регистрации нейтронов сцинтилляционным счетчиком на базе ZnS(Ag):6LiF / Д. А. Бучный, В. С. Литвин, Д. Н. Трунов [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2022. – № 12. – С. 38-47. – DOI 10.31857/S1028096022120081.