

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Физического института им. П. Н.
Лебедева д.ф.-м.н., профессор Рябов В.А.

« 22 » октября 2024

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Трунова Дмитрия Николаевича «Сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе кремниевых фотоумножителей и органического световода», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 - Приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность темы диссертации

В настоящее время особое развитие получили детекторы нейтронов на основе сцинтилляторов. Связано это с высокой стоимостью основного изотопа гелий-3, используемого для широкого спектра детекторов. Необходимость развития современных высокоэффективных детекторов нейтронов связана растущими потребностями науки и большим количеством научно-исследовательских центров, в которых потребуется применение таких детекторов. В частности, в ближайшее время планируется ввод исследовательских установок на реакторе ПИК «Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова» в Гатчине. Кроме того, в мире активно развивается направление применения компактных источников нейтронов в таких проектах как, например, LENS (Low Energy Neutron Source, CHIA), CPNS (Китай) и проект DARIA (Россия). К детекторам, работающим на таких источниках нейтронов предъявляются более высокие требования: большая эффективность регистрации нейтронов и компактные размеры и высокое разрешение.

Диссертация посвящена развитию методов увеличения эффективности регистрации и повышению разрешения детекторов нейтронов, которые играют ключевую роль в научно-исследовательских дифракционных установках. Решение этих задач позволяет повысить эффективность работы существующих и проектируемых

дифракционных установок.

Целью исследования является разработка методов увеличения эффективности регистрации тепловых нейтронов и повышения разрешения дифракционных установок. Для достижения этой цели решен ряд важных методических задач. В частности, разработан метод согласования размеров фотоприёмника и световода, метод увеличения загрузочной способности кремниевых фотоумножителей, метод определения координаты в позиционно-чувствительных детекторах, а также разработаны детекторы, в которых реализуются перечисленные выше методы. Кроме того, диссертантом разработана уникальная дифракционная установка «СФЕРА», которую возможно использовать в составе компактного источника нейтронов.

Учитывая большое внимание к современным дифракционным установкам и проектируемым источникам нейтронов (в том числе и компактным), представленную диссертационную работу, безусловно, следует признать актуальным исследованием.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объём диссертации составляет 135 страниц, включая 83 рисунка и 3 таблицы. Библиография содержит 89 наименований.

Во Введении обосновывается актуальность исследований в области развития сцинтилляционных детекторов нейтронов для дифракционных исследований. Дается обзор научной литературы, указываются цели исследования и задачи, решение которых необходимо для достижения цели. Показывается научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

Первая глава представляет проблему использования детекторов нейтронов для дифракционных исследований. Проведен развернутый обзор существующих двухмерных и одномерных детекторов нейтронов. Основное внимание в обзоре уделено детекторам нейтронов, описанию их параметров и основных недостатков. Приведены примеры использования детекторов нейтронов в существующих исследовательских установках.

Вторая глава развернуто описывает недостатки и преимущества использования кремниевого фотоумножителя и пластикового световода в качестве компонентов детектора нейтронов. Дается подробное описание разработки и моделирования представленных детекторов нейтронов. Приведено сравнительное тестирование разработанных детекторов с детекторами на основе спектрсмещающих волокон. В главе описаны разработанные автором метод увеличения загрузочной способности кремниевых фотоумножителей и метод согласования размеров фотоприёмника и световода. Также в

главе описаны разработанные предусилители и система накопления экспериментальных данных. Вторая часть главы посвящена разработке двухмерных позиционных детекторов нейтронов. Приведено описание разработанного автором метода определения координаты. Показана возможность реализации метода определения координаты моделированием оптических параметров детекторов. Также в главе описаны параметры детекторов, разработанных для тестирования.

Третья глава посвящена определению эффективности детекторов и тестированию параметров на времяпролетном нейтронном источнике ИН-06 ИЯИ РАН. Дано описание нейтронного источника. В главе описано определение эффективности регистрации полученных детекторов и показана зависимость эффективности от количества слоев сцинтиллятора. Обсуждаются результаты тестирования детекторов на реальных образцах, а также описано тестирование одномерных и двухмерных детекторов нейтронов на источниках нейтронов и определение координатного разрешения детекторов.

В четвертой главе приведено описание разработанной многофункциональной установки «СФЕРА» (дифрактометр «СФЕРА»). Показаны основные требования к детекторам, входящим в состав дифрактометра. Приведены параметры разрешения и описаны возможные способы увеличения эффективности устройства. Приведено описание разработанного патента на дифрактометр «СФЕРА» и представлены основные параметры, полученные при тестировании.

В Заключении приведены основные результаты работы:

1. Разработана и изготовлена многофункциональная экспериментальная установка «СФЕРА» для дифракционных исследований на монохроматическом и времяпролетном нейтронном пучке. За счет широких возможностей по варьированию угла, разрешения и 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.

3. Разработаны линейные сцинтилляционные детекторы тепловых нейтронов на основе пластикового прозрачного световода и кремниевых фотоумножителей. 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 объеме световода достигается при использовании диффузного отражающего покрытия. Проведена апробация разработанных

прототипов детекторов на импульсных источниках нейтронов ИН-06 и РАДЭКС ИЯИ РАН с использованием тестовых образцов.

5. Разработан и впервые применен метод согласования размеров фотоприёмника и световода на основе использования сверхширокоугольной линзы с целенаправленно увеличенной дисторсией. 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. Разработан и впервые применен метод увеличения загрузочной способности кремниевых фотоумножителей, основанный на ускоренной компенсации емкости, который позволяет увеличить загрузочную способность в 2.7 раза.

7. Проведено теоретическое моделирование, по результатам которого разработаны несколько вариантов позиционно-чувствительных детекторов. Определено координатное разрешение, которое составляет 5-10 мм для одномерного детектора и 7-10 для двумерного детектора.

Научная новизна

В диссертационной работе описан ряд разработанных и успешно примененных автором новых методов: метод согласования размеров фотоприёмника и световода, метод увеличения загрузочной способности кремниевых фотоумножителей, а также метод определения координат, основанный на анализе амплитуды ограниченным количеством кремниевых фотоумножителей. Кроме этого, были разработаны новые линейные сцинтилляционные детекторы нейтронов для дифракционных экспериментов. Эти детекторы с высокой эффективностью регистрации нейтронов обладают возможностью получения высокого разрешения за счет варьирования геометрии световода. Отдельно следует отметить разработанный дифрактометр «СФЕРА», обладающий уникальной геометрией.

Автором проведено сопутствующее оригинальное исследование, на ряд методов и приборов получены патенты, показывающие их новизну. Также были разработаны авторские программные пакеты, обеспечивающие проведение дифракционных экспериментов.

Значимость результатов для науки и производства

Разработанные методы, которые описаны в диссертации, служат значительному усовершенствованию детектирующих средств в области нейтронной физики, что уже реализовано в конкретной экспериментальной установке на базе источника нейтронов

ИН-06 ИЯИ РАН. В дальнейшем эти наработки могут быть использованы во многих других нейтронных исследованиях, так как носят достаточно универсальный характер. Метод сбора фотонов позволяет изготавливать сцинтилляционные детекторы с отсутствием мертвых зон. Метод увеличения нагрузочной способности позволяет снизить мертвое время детектора до физического минимума. Он также повышает нагрузочную способность, что может быть востребовано в других областях применения кремниевых фотоумножителей. Метод определения координат, позволяет существенно снизить стоимость детекторной системы за счет использования двух или четырех фотоприемников. Разработанная дифракционная установка «СФЕРА» обладает высоким телесным углом захвата излучения и широкими возможностями по настройке углов, позволяя реализовать широкий спектр дифракционных экспериментов на различных источниках нейтронов.

Апробация результатов работы и публикации

Достоверность полученных автором результатов подтверждена проверкой на источнике ^{252}Cf и дифракционных установках источников ИН-06 и РАДЭКС ИЯИ РАН. Оптические параметры были получены на основе Монте-Карло моделирования. Описания методов изложены таким образом, что возможно их полное воспроизведение и проверка результатов.

Основное содержание диссертационной работы представлено в 16 публикациях, включая 9 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 препринте, 1 патенте на полезную модель, 3 патентах на изобретение и 2 свидетельствах о государственной регистрации программ для электронных вычислительных машин.

Замечания

По результатам рассмотрения текста диссертации можно сделать следующие замечания:

1. Во введении про степень достоверности результатов написано, что они получены на основе экспериментальных материалов, достаточных для получения статистически достоверных данных. И в описательной части диссертации это действительно отражено. Однако далеко не везде значения даются с погрешностями.
2. В разделе 3.2 рассмотрено сравнительное тестирование гелиевых счетчиков СНМ-17 и сцинтилляционных счетчиков, проведенное на установке РАДЭКС. На рисунке 58 показаны 4 детектора в каждом узле, хотя по тексту их указано три.

Рисунок 59 показывает отличие полученных спектров, но не приведена количественная оценка этого отличия. Аналогичную оценку несложно было бы провести и для установки МНС со счетчиками СММ-18.

3. В диссертации несколько раз указывается на низкую цену сцинтилляционных детекторов как несомненное достоинство, но не приводится хотя бы приблизительная ее оценка в сравнении с повсеместно используемыми до сих пор гелиевыми счетчиками. Конечно, корректная экономическая оценка должна учитывать, по возможности, все затраты на изготовление и эксплуатацию всего комплекса каждой экспериментальной установки с близкими параметрами, что весьма затруднительно. Но хотя бы один убедительный пример представляется необходимым.
4. В разделе 2.1.5 приводятся рассуждения по выбору электроники для сцинтилляционных детекторов. Выбранная идеология и дальнейшая ее реализация вопросов не вызывает. Странным выглядит отказ от «модификации существующих модулей под крейт VME», поскольку и разработку новых модулей, и написание программ для новой электроники все равно пришлось выполнять.
5. По всему тексту встречаются лингвистические огрехи, иногда плохая подача графического материала и небрежность в обозначениях физических величин и их значений, которые вполне характерны для диссертантов. Но это не мешает правильному пониманию излагаемого материала, хотя местами, при заметном избытке, портят общее впечатление от хорошей и в целом добротной работы.

Приведенные выше замечания не снижают общей высокой оценки проделанной диссертационной работы.

Заключение

Диссертация Трунова Д.Н. является законченным научным исследованием. Достоверность выводов и результатов диссертации, а также их новизна и актуальность не вызывают сомнений. Основные результаты работы опубликованы в ведущих научных журналах, входящих в перечень ВАК, и представлены на российских и международных научных конференциях.

Автореферат и опубликованные работы полностью и правильно отражают содержание диссертации.

Диссертация Трунова Дмитрия Николаевича «Сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе кремниевых фотоумножителей и органического световода» удовлетворяет п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного

постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв составлен старшим научным сотрудником Лаборатории нейтронной физики Нейтронно-физического отдела Отделения физики твердого тела Физического института Российской академии наук, кандидатом физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика ядра и элементарных частиц Мешковым Игорем Владимировичем.

Доклад по материалам диссертации был сделан Труновым Дмитрием Николаевичем на семинаре Отделения физики твердого тела Физического института им. П.Н.Лебедева РАН. Настоящий отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого совета Отделения физики твердого тела Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, протокол № 06/24 от 18 октября 2024 г.

Старший научный сотрудник
Лаборатории нейтронной физики ФИАН,
кандидат физико-математических наук

/Мешков И.В.

Мешков Игорь Владимирович
+7(499)132-66-74 meshkoviv@lebedev.ru

Главный научный сотрудник, исполняющий обязанности
руководителя Отделения физики твердого тела ФИАН
доктор физико-математических наук

/ Кривобок В.С

Кривобок Владимир Святославович
+7(499)132-64-48 krivobokvs@lebedev.ru

Подписи Мешкова И.В. и Кривобока В.С. заверяю:

Ученый секретарь ФИАН,
кандидат физико-математических наук

/ Колобов А.В.

Колобов Андрей Владимирович
+7(499)132-62-06 kolobov@lebedev.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФГБУН ФИ РАН), Россия, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53, тел. 8(499)135-42-64, факс 8(499)135-78-80, <http://www.lebedev.ru/>; postmaster@lebedev.ru

Список основных публикаций работников организации по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15):

1. Мешков И.В., и др. Исследование пространственного распределения потока нейтронов с помощью детекторов на основе гелия-3 и бора-10 // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2020. – Т. 84, № 4. – С. 497-500.
2. Мешков И.В., и др. О возможности контроля максимальной энергии быстрых нейтронов по амплитудным спектрам от 10В-детектора // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2021. – Т. 85, № 10. – С. 1385-1388.
3. Мешков И.В., и др. Исследование направленной чувствительности двухкоординатного детектора нейтронов на основе слоя 10В и проволочной камеры // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2022. – Т. 86, № 8. – С. 1087-1090.
4. Мешков И.В., и др. Зависимость пространственного положения и размеров нейтронного потока от максимальной энергии нейтронов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2021. – Т. 85, № 10. – С. 1381-1384.
5. Мешков И.В., и др. Применение детектора с активным слоем 10В для регистрации тепловых и быстрых нейтронов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2021. – № 10. – С. 108-112.