

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.163.01
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от **14.11.2024 г. № 20/13**

О присуждении **Трунову Дмитрию Николаевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе кремниевых фотоумножителей и органического световода» по специальности 1.3.2— «Приборы и методы экспериментальной физики» принята к защите 20.06.2024 г., протокол №16/9 диссертационным советом 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 823/нк от 20 апреля 2023 года.

Соискатель Трунов Дмитрий Николаевич 1989 года рождения. В 2011 году соискатель окончил программу обучения Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по специальности 21.01.03—«Микроэлектроника и твердотельная электроника», специализация 20.01.08 «Физика и технология интегральных микросхем и полупроводниковых приборов» (диплом - К № 03869 , выданный 09.07.2011 г.). В 2011 году поступил в аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по направлению подготовки 03.06.01 - Физика и астрономия по специальности 01.04.01 (1.3.2) - «Приборы и методы экспериментальной физики», окончил аспирантуру ИЯИ РАН 01.10.2015 г. В

настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории нейтронных исследований ИЯИ РАН.

Диссертация выполнена в секторе конденсированного состояния лаборатории нейтронных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук.

Научный руководитель - кандидат физико-математических наук, **Садыков Равиль Асхатович**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), лаборатория нейтронных исследований, ведущий научный сотрудник, и.о. зав. сектора конденсированных состояний.

Официальные оппоненты:

Эм Вячеслав Терентьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“» (НИЦ «Курчатовский институт»), Курчатовский комплекс синхротронно-нейтронных исследований, Отдел нейтронных экспериментальных станций, главный научный сотрудник,

Боднарчук Виктор Иванович, кандидат физико-математических наук, Международная межправительственная организация Объединённый институт ядерных исследований, Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Научно-экспериментальный отдел комплекса спектрометров ИБР-2, начальник отдела, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук, (ФИАН) г. Москва,

- в своем положительном заключении, подписанном старшим научным сотрудником лаборатории нейтронной физики ФИАН, кандидатом физико-математических наук, Мешковым Игорем Владимировичем и главным научным сотрудником, исполняющим обязанности руководителя отделения физики твердого тела ФИАН, доктором физико-математических наук Кривобоком

Владимиром Святославовичем и утвержденном заместителем директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева доктором физико-математических наук, профессором Рябовым Владимиром Алексеевичем, указала, что работа отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Трунов Дмитрий Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 - «Приборы и методы экспериментальной физики».

Соискатель имеет 16 публикаций, включая 9 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, в том числе 6 статей — в журналах, индексируемых международными базами цитирования Scopus и Web of Science. Также соискатель имеет 1 препринт, 1 патент на полезную модель, 3 патента на изобретение, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для электронных вычислительных машин.

Представленные соискателем сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Текст опубликованных работ полностью соответствует тематике диссертации, они написаны либо при решающем участии соискателя, либо им самостоятельно.

Список основных работ по результатам диссертационного исследования:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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>

7. 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

8. 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

9. 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

10. 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.

11. 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)

12. 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".

13. 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.

14. 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)

15. 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.

16. 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.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что диссертация содержит важные физические и методические результаты, имеющие большое научное значение и практическую ценность. Диссертация полностью отвечает всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым Положением о порядке присуждения ученых степеней, утверждённым Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013г.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой квалификацией оппонентов и сотрудников ведущей организации и наличием работ высокого научного уровня по близкой тематике.

В отзывах оппонентов и ведущей организации были высказаны следующие критические замечания и пожелания:

- 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.
- 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 СНМ-18.

- 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.

- 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.

- 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. В тексте диссертации содержится много опечаток, редакции текста уделено недостаточно внимания.

- В диссертации мало внимания уделено сравнению разрабатываемых сцинтилляционных детекторов с детекторами других типов по таким параметрам как, временное и пространственное разрешение. В связи с этим иногда трудно оценить достижения автора в ряду других разработок в этой области.

- В формуле (4) главы 1.2.3 величина d , стоящая и в правой, и в левой части равенства очевидно две разные по смыслу величины, поскольку слева от знака равенства означает межплоскостное расстояние, а справа - ширину детектора. Величина T_p в подписи обозначена без индекса, как T . Недостаточно раскрыта суть вопроса, касающаяся позиционного разрешения. В тексте не раскрывается чем определяется эта величина.

- Проблема разделения n - Γ в сцинтилляционных детекторах нейтронов гораздо глубже, чем простой анализ амплитудных распределений каждой из компонент.

Для сигнала от регистрации нейтрона сцинтиллятором ZnS характерна сложная форма сигнала, растянутая во времени с множеством биений, разной амплитуды. Амплитуды биений зависят от светосбора от конкретного события и затухают со временем. Если основываться на дискриминации сигнала по амплитуде, то можно отделить события, вызванные регистрацией γ , только за счет потери части сигналов, полученных от нейтронов, т.е. существенно снизив эффективность регистрации нейтронного излучения.

-В тексте диссертации термин «детектор» применяется и для отдельного счетчика, и для составного детектора, что вносит путаницу в понятия. Следовало бы разделять понятия отдельный элемент - «счетчик» и «детектор», состоящий из набора счетчиков.

- Утверждение «Для прозрачного сцинтиллятора с увеличением толщины будет падать разрешение, а в случае использования непрозрачного сцинтиллятора, невозможно добавить дополнительный слой сцинтиллятора» из главы 1.4 неверное. Для непрозрачного сцинтиллятора вполне возможно использование многослойной конструкции.

- В утверждении «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.» из главы 2 фраза «вертикально по радиусу кольца от образца» непонятна. Автор не упоминает, что кольца Дебая-Шеррера метод для порошковой дифракции и монохроматического пучка.

- Неясно, что такое «перенапряжение» на Рис.17?

- В утверждении «В тестовой версии детектора использовался сцинтиллятор с эффективностью 28% и толщиной 0.45 мм» из главы 2.1.1. неясно для какой длины волны?

- На рисунке 20 отсутствует масштаб оси абсцисс. Для сцинтиллятора ZnS это является принципиальным моментом. Сигнал от единичного события представляет собой затянутый на несколько микросекунд сигнал со множеством осцилляций переменной амплитуды и принципы отбора для таких сигналов являются одними из самых принципиальных моментов для такого рода детекторов. Если ориентироваться только на первый пик и отрезать все

остальные, то это неизбежно приведет к потере доли полезных событий.

- Соискатель использует неверные термины «монохроматические дифрактометры» и «монохроматические приборы» (стр. 15), «дифракционные детекторы» (подпись к рисунку 2 на стр. 19), «томографические детекторы» (стр. 24).

- Не понятно предложение «Это позволяет производить (?) рассеяние нейтронов при различных длинах волн и ориентациях образца относительно пучка» на стр. 16.

- Подпись к рисунку 1 на стр. 18: «График зависимости сечения нейтронов в зависимости (?) от энергии нейтрона» не ясна.

- Соискатель часто использует названия изотопов (гелий 3, бор 10) не склоняя их. Например, выражение “детекторы на основе гелий 3» (стр. 19) правильно будет написать «детекторы на основе гелия 3».

- Подпись к рисунку 3 на стр. 26 «Принципиальная схема регистрации нейтронов с (?) газонаполненного детектора» сформулирована плохо.

- На рисунках 30 и 31 (стр. 53, 55) пронумерованы отдельные детали, название которых дается в тексте на других страницах (54, 56), что затрудняет чтение.

Следовало бы указать название деталей в подписи к рисункам.

- Предложение «Основные недостатки – требуется высокий (?) объем газа гелий 3» на стр. 34 сформулировано ошибочно.

- Предложение «..... если небольшой фотодетектор считывает (?) большой лист сцинтилляционного материала» на стр. 40 не понятно.

- Предложение «Основной вклад в транспортировку фотонов, даже при небольших размерах световода начинает иметь (?) эффект полного внутреннего отражения» на стр. 71 сформулировано плохо.

- «... Но таким способом не получится добиться высокого разрешения (более 10 мм)» (стр. 85). Пространственное разрешение становится более высоким при уменьшении размеров различаемых объектов, а не увеличении.

- «В частности, сцинтиллятор расположен в объеме сцинтиллятора» (стр.88). «За счет большего затухания детектор имеет большее разрешение (примерно 5

мм)» (стр. 107). Из этих фраз непонятно, детектор имеет более высокое или низкое разрешение.

- На рисунке 61 (стр. 97) для сравнения гелиевых и сцинтилляционных детекторов приведены времяпролетные спектры образца жаропрочного сплава MoTiC. Из рисунка трудно сравнить эти детекторы, поскольку при съемке спектров использовались разное количество детекторов, разные расстояния образец- детектор и разные углы рассеяния.

В целом, диссертация написана четким и понятным языком, но не лишена опечаток, грамматических и стилистических ошибок. Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы. Соискатель Трунов Д.Н. ответил на заданные в ходе защиты вопросы и высказанные замечания.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Была создана уникальная многофункциональная экспериментальная установка “СФЕРА” 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. 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. Оригинальные программные пакеты для накопления экспериментальных данных и настройки предусилителей детекторов нейтронов на основе SiPM.

3. Разработаны линейные сцинтилляционные детекторы 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. Проведено оптическое моделирование и измерения тестовых образцов на импульсном источнике ИН-06 и РАДЭКС ИЯИ РАН.

5. Разработан метод согласования размеров фотоприёмника и световода на основе использования сверхширокоугольной линзы с целенаправленно увеличенной дисторсией.

6. Разработан метод увеличения нагрузочной способности кремниевых фотоумножителей, основанный на компенсации заряда ячеек кремниевого фотоумножителя. За счет компенсации заряда ячеек, метод позволяет увеличить нагрузочную способность кремниевого фотоумножителя в 2.7 раза.

7. Разработан 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.

Теоретическая и практическая значимость исследования обоснована тем, что:

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 нагрузочной способности позволяет

снизить мертвое время детектора. 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.

Представленные в диссертации научные результаты являются новыми, обоснованными и достоверными, что подтверждается качественным согласием результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Также новизна подтверждается полученными патентами. Полученные диссертантом результаты были представлены на основных международных конференциях, совещаниях коллаборации и международных научных групп по тематике исследования.

Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Автор лично принимал участие в получении всех упомянутых экспериментальных результатов. Диссертант лично принимал участие в получении и обработке исходных данных экспериментов, разработке методов и проектировании дифрактометра “СФЕРА”. Трунов Д.Н. лично принимал непосредственное участие в подготовке основных публикаций по теме

диссертации, а также в процессе апробации результатов исследования.

На заседании 14 ноября 2024 года диссертационный совет принял решение присудить Трунову Дмитрию Николаевичу ученую степень кандидата физико-математических наук за разработку и исследование сцинтилляционных детекторов нейтронов на основе кремниевых фотоумножителей и органического световода.

При проведении тайного голосования, диссертационный совет в количестве **20** человек, из них **7** докторов наук по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики, участвовавших в заседании, из **27** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту **0** человек, проголосовали: **за - 19**, **против - 0**, **недействительных бюллетеней - 1**.

Председатель
диссертационного совета 24.1.163.01
доктор техн. наук, чл.-корр. РАН

_____ Кравчук Л.В.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01
кандидат физ.-мат. наук

_____ Демидов С.В.

14.11.2024 г.

М.П.