

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Директор Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Физический институт им. П.Н.  
Лебедева Российской академии наук  
д.ф.-м.н., член-корр. РАН

Н.Н. Колачевский

«10» ноября 2023 г.

**ОТЗЫВ**

**ведущей организации на диссертацию**

**Тимофеева Александра Владимировича**

**«Многоэлементный сцинтилляционный экран для регистрации потоков  
жестких гамма-квантов»,**

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 в ИЯФ СО РАН ведутся работы по использованию технологий регистрации жесткого гамма-излучения в области рентгенографии оптически плотных объектов, развитых для детекторов физики элементарных частиц. Традиционные методы в рентгенографии имеют ряд недостатков по сравнению с методами, используемыми в детекторах элементарных частиц, таких как низкая эффективность регистрации и малый световой сбор. Для решения современных задач в области рентгенографии требуется улучшение характеристик систем регистрации жестких гамма-квантов. Использование волоконной оптики вместо стандартных оптических элементов позволяет более чем на порядок увеличить эффективность светового сбора, а использование многоэлементного экрана, позволяет повысить эффективность регистрации за счет значительного увеличения длины кристалла.

В диссертационной работе А.В. Тимофеева представлены результаты, полученные в ходе разработки многоэлементного сцинтилляционного экрана, в котором вместо традиционной оптики и матричного фотоприемника используются различные полимерные оптические волокна и PIN фотодиоды. В связи с этим исследования, представленные в диссертации А.В. Тимофеева, являются актуальными и значимыми для рентгенографии оптически плотных объектов.

## Оценка структуры и содержания диссертации

Диссертация Тимофеева А.В. состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 129 страниц, 69 рисунков и 11 таблиц. Список литературы содержит 96 наименований.

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, показаны новизна и практическая значимость проводимого исследования, а также представлены выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена обзору методов и приборов, которые используются в рентгенографии, томографии, детекторах ионизирующих частиц.

Рассмотрены полупроводниковые, газовые, сцинтилляционные детекторы и рентгеновские пленки. Наибольшей эффективностью регистрации гамма-излучения обладают детекторы на основе сцинтилляторов. Обсуждается проблема достижения максимальной эффективности светового сбора. Если фотоприемник располагается на торце сцинтиллятора, то при регистрации больших потоков гамма-квантов часть излучения неизбежно достигает фотоприемника, что приводит к регистрации дополнительного паразитного сигнала с большими флуктуациями, поэтому необходимо вынести фотоприемник из области образования электронов.

Для решения этой проблемы предлагается использовать спектросмещающие волокна, с целью сбора светового сигнала с неорганических сцинтилляторов. Данный метод также позволяет вынести фотоприемники из области интенсивного образования заряженных частиц.

Вторая глава посвящена расчетам и экспериментам по выбору спектросмещающего волокна.

В качестве производителя волокна была выбрана фирма Kugaгау, Япония. Фирма Kugaгау обладает технологией по производству волокна с двойной оболочкой и высокой числовой апертурой, что позволяет значительно увеличить эффективность сбора светового сигнала по сравнению с другими производителями.

Оптимальной спектросмещающей добавкой для волокна является фотолюминесцентный краситель, спектр поглощения которого полностью перекрывает спектр высвечивания сцинтиллятора BGO. Наиболее подходящими добавками являются красители O-2 и Y-11. Существенным недостатком спектросмещающих волокон является малая длина поглощения переизлученного света ( $1\div 4$  м), поэтому для сбора света с сцинтиллятора предлагается использовать короткие спектросмещающие волокна длиной около 10 см, а для передачи светового сигнала использовать оптические волокна с длиной затухания более 10 м.

Третья глава посвящена исследованию величины светового сбора регистрирующего элемента.

Проведены расчёты, моделирование и измерения светового сбора для регистрирующего элемента, состоящего из сцинтиллятора BGO и

спектрсмещающего волокна. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с результатами моделирования. Величина светового выхода составила около 150 фотонов/МэВ, что является достаточным для данного детектора.

Было получено, что в случае использования спектрсмещающего волокна световой сбор не зависит от длины кристалла и отклик на гамма-квант равномерен по длине кристалла. Это позволяет значительно увеличить эффективность регистрации потоков жестких гамма-квантов за счет увеличения длины кристалла, причём оптические характеристики канала регистрации не ухудшаются. Для оценки эффективности регистрации гамма-квантов было проведено моделирование зависимости энерговыделения в кристалле от длины кристалла при энергиях гамма-квантов 1, 2 и 4 МэВ.

Четвертая глава посвящена расчетам и измерениям параметров оптического волокна.

Как правило, оптические волокна массово используются в промышленности для создания коммуникационных сетей. Так как информация от производителя о характеристиках оптического волокна вне окна прозрачности и потерях при полной числовой апертуре сигнала отсутствует, использование таких оптических волокон со спектрсмещающими волокнами требует дополнительного изучения.

Проведены расчеты и сравнение оптических волокон на основе различных материалов. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом. Волокна на основе полистирола обладают большей эффективностью, но меньшей длиной затухания. Волокна на основе PMMA обладают меньшей эффективностью, но имеют большую длину затухания. В случае длинных оптических волокон более 4 м, оптимальными являются волокна на основе PMMA с числовой апертурой 0,6.

Пятая глава посвящена фотоприемникам. В этой главе описано исследование их характеристик (темновой ток, емкость, квантовая эффективность), проведены расчеты оптимальной толщины защитного покрытия с учетом спектра высвечивания спектрсмещающего волокна и углового распределения света.

Шестая глава посвящена модулю многоэлементного сцинтилляционного экрана (МСЭ). Реализована блочно-модульная конструкция МСЭ, которая имеет ряд преимуществ. Разработан и оптимизирован модуль МСЭ. Измерен средний световой выход канала детектора. Также проведен выходной контроль всех каналов детектора.

В заключении диссертации представлены итоги диссертационной работы, сформулированы ее результаты.

Основные результаты, представленные к защите, заключаются в следующем:

1. Разработан и создан многоэлементный сцинтилляционный экран для регистрации жестких гамма-квантов.
2. Проведены расчетные и экспериментальные исследования различных характеристик компонентов многоэлементного сцинтилляционного экрана на специально разработанных стендах.

3. Разработана блочно-модульная конструкция многоэлементного сцинтилляционного экрана.
4. Было получено, что в методе косвенного съема отсутствует зависимость светового сбора от длины кристалла в диапазоне длин от 20 до 60 мм. С учетом технологии изготовления кристаллов это позволило увеличить их длину с 30 до 50 мм, что повысило эффективность регистрации жестких гамма-квантов в 1,42 раза и улучшило энергетическое разрешение в 1,37 раза.
5. Измерен средний сигнал канала детектора, который составляет  $49 \pm 6$  фотоэлектронов/МэВ. Полученный сигнал находится в соответствии с проведенными расчетами и позволяет обеспечить регистрацию потоков жестких гамма-квантов с минимальным энергетическим разрешением.

Сформулированные в заключении результаты соответствуют положениям, представленным для защиты во введении диссертации.

#### **Научная новизна диссертационной работы**

1. Впервые создан многоэлементный сцинтилляционный экран с использованием спектросмещающих волокон для рентгенографических исследований.
2. Продемонстрирована возможность эффективного использования спектросмещающих волокон совместно с кристаллическими сцинтилляторами с высоким показателем преломления.

#### **Научная и практическая значимость полученных результатов**

1. Разработанный многоэлементный сцинтилляционный экран позволяет проводить рентгенографические исследования оптически плотных объектов с рекордной точностью.
2. Разработанные методики расчета эффективности светового сбора для косвенного метода съема позволяют рассчитывать эффективность подобных детекторов с другими параметрами.

#### **Замечания по диссертационной работе**

1. В автореферате на стр. 10 указана эффективность захвата света волокном  $2,4 \pm 0,5\%$ . Из текста непонятно, как это число получено. Экспериментальное измерение данного числа проблематично. Необходимо пояснить, как сравнивается падающий поток света с выходящим, особенно с учётом спектра этого света. Не ясно, является это число результатом измерения или это теоретическая оценка.
2. На рис. 20 указана схема стенда. Выходящий свет от лазера после отражения неправильно направлен.
3. На рис. 39 б) размеры на боковых сторонах указаны не по ГОСТу, верх не в ту сторону.



## **Заключение Общелабораторного семинара Лаборатории тяжёлых кварков и лептонов**

Диссертационная работа Тимофеева А.В. «Многоэлементный сцинтилляционный экран для регистрации потоков жестких гамма-квантов» заслушана на Общелабораторном семинаре Лаборатории тяжёлых кварков и лептонов федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук 08 ноября 2023 г. Были одобрены следующие выводы.

1. Содержание диссертационной работы Тимофеева Александра Владимировича «Многоэлементный сцинтилляционный экран для регистрации потоков жестких гамма-квантов» соответствует паспорту научной специальности 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики». Диссертация представляет собой выполненную на высоком научном уровне законченную научно-исследовательскую работу.
2. Представленные в работе результаты исследований актуальны, новы и оригинальны, выводы и заключения аргументированы и обоснованы.
3. Личный вклад автора в результаты представленной работы является определяющим. Выносимые на защиту положения подтверждают персональный вклад автора в представленную работу.
4. Автореферат оформлен в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии и в достаточной мере отражает содержание диссертации.
5. Диссертация Тимофеева А.В. «Многоэлементный сцинтилляционный экран для регистрации потоков жестких гамма-квантов» соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Тимофеев Александр Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв рассмотрен и утверждён на заседании Учёного совета лаборатории, протокол № 23 от 8 ноября.

Секретарь Учёного совета лаборатории тяжёлых кварков и лептонов,  
ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
кандидат физико-математических наук,  
высококвалифицированный старший научный сотрудник

Е.И. Соловьёва



Отзыв составил:

Друцкой Алексей Георгиевич,  
доктор физико-математических наук,  
специальность 01.04.23 – Физика высоких энергий  
высококвалифицированный ведущий научный сотрудник, и. о. зав. лабораторией,  
Лаборатория тяжёлых кварков и лептонов ФИАН,  
ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Тел.: +7 915-451-6587, e-mail: [Drutskoy@lebedev.ru](mailto:Drutskoy@lebedev.ru)

А.Г. Друцкой



---

8 ноября 2023 года

Подпись Друцкого А.Г. заверяю  
Учёный секретарь ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
кандидат физико-математических наук,

А.В. Колобов



---

Контакты ведущей организации:

Почтовый адрес:

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН

Тел.: +7 (499) 135-42-64

Факс: +7 (499) 135-78-80

E-mail: [postmaster@lebedev.ru](mailto:postmaster@lebedev.ru)

Сайт организации: <http://www.lebedev.ru/>