

*На правах рукописи*



**Тимофеев Александр Владимирович**

**МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЙ СЦИНТИЛЯЦИОННЫЙ ЭКРАН  
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПОТОКОВ ЖЕСТКИХ ГАММА-КВАНТОВ**

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – кандидат физико-математических наук, доцент Григорьев Дмитрий Николаевич

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Измайлов Александр Олегович – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, старший научный сотрудник

Ставинский Алексей Валентинович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», начальник лаборатории

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Защита диссертации состоится «05» декабря 2023 года в «16:30» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-02>.

Автореферат разослан «25» октября 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических  
наук, профессор РАН



Лотов Константин  
Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В ИЯФ СО РАН активно ведутся работы по использованию развитых для физики элементарных частиц передовых технологий в других направлениях. Одним из направлений является рентгенография объектов с высоким атомным номером и большой толщиной для применения в интересах обеспечения безопасности и индустрии.

При рентгенографии объектов с высокой плотностью и большой толщиной в качестве детектора гамма-квантов широко используются мозаичные экраны или линейки из тяжелых сцинтилляционных кристаллов. Как правило, световой сигнал регистрируется фотоприемниками на основе PIN (positive-intrinsic-negative) фотодиодов или матричных фотоприемников. Использование матричных фотоприемников и оптических элементов позволяет разместить фотоприемники и электронику вне области ионизирующего излучения. Но существенным недостатком использования матричных фотоприемников является малая эффективность оптических элементов. Основными преимуществами PIN фотодиодов являются большой динамический диапазон и стабильность. Классически для максимальной эффективности светового сбора они размещаются на торце сцинтиллятора. Недостатком PIN фотодиодов является отсутствие усиления, поэтому электроника располагается в непосредственной близости от фотодиода (ФД) для обеспечения наибольшего соотношения сигнал/шум.

Через объекты, размер которых составляет много длин поглощения, в основном проходят гамма-кванты с энергией, соответствующей минимальному сечению взаимодействия (окно прозрачности). Для материалов с высоким атомным номером прошедшие гамма-кванты имеют диапазон энергий 2 – 6 МэВ. Окно прозрачности тяжелых сцинтилляторов находится в том же диапазоне. Поэтому значительная доля гамма-излучения проходит через сцинтилляционный кристалл, и существует вероятность взаимодействия гамма-квантов с веществом вблизи ФД. В результате взаимодействия гамма-кванта с веществом образуется электрон, ионизационные потери которого в чувствительной области ФД регистрируются как паразитный сигнал. Данный сигнал в десятки раз больше, чем полезный сигнал от взаимодействия гамма-кванта в сцинтилляторе, так как средняя энергия образования электронно-дырочной пары в кремнии 3,67 эВ, а конверсионная эффективность тяжелых сцинтилляторов составляет 30 – 100 эВ/фотон. Паразитный сигнал имеет большой статистический разброс из-за низкой вероятности взаимодействия гамма-кванта с веществом вблизи ФД, поэтому во многих случаях паразитный сигнал вносит определяющий вклад в энергетическое разрешение. Альтернативным методом является использование волоконно-оптических

линий для передачи сцинтилляционного света от кристаллов на фотоприемники. В данном случае фотоприемники и электроника выводятся из-под вредного воздействия гамма-излучения. При этом, однако, происходит неизбежная потеря светового сигнала больше, чем на порядок. Это значительно ужесточает требования к реализации всего тракта транспортировки света от сцинтиллятора к фотоприемнику.

Использование спектросмещающих волокон позволяет собирать свет со значительной части сцинтиллятора за счет переизлучения сцинтилляционного света и захвата части переизлученного света волокном. Вклеивание спектросмещающего волокна в сцинтиллятор повышает надежность конструкции. Также использование спектросмещающего волокна позволяет использовать фотоприемники меньшей площади, что приводит к уменьшению шумов. Так как спектросмещающие волокна имеют длину затухания от 1 до 4 м, наиболее оптимальной схемой передачи оптического сигнала является использование комбинации спектросмещающих и оптических волокон.

### **Степень разработанности темы исследования**

Спектросмещающие волокна широко используются для создания детекторов на основе органических сцинтилляторов. В большинстве случаев основным материалом и органических сцинтилляторов, и спектросмещающих волокон является полистирол с различными добавками. Поэтому оптические и механические свойства спектросмещающих волокон и органических сцинтилляторов отличаются незначительно. Так как механические и оптические свойства тяжелых сцинтилляторов значительно отличаются от свойств спектросмещающих волокон, возможность их совместного использования следует дополнительно изучить.

### **Цели и задачи**

**Целью** диссертационного исследования является разработка и изготовление многоэлементного сцинтилляционного экрана для регистрации потоков жестких гамма-квантов с эффективностью не менее 50% и собственным шумом, не превышающим статистический разброс потока гамма-квантов. Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие **задачи**:

1. Разработать методики исследования характеристик элементов многоэлементного сцинтилляционного экрана и создать необходимые для проведения измерений стенды;
2. Исследовать различные спектросмещающие и оптические волокна и выбрать оптимальные;

3. Провести расчетные и экспериментальные исследования параметров регистрирующего элемента;
4. Определить оптимальные параметры фотоприемников и произвести измерения их характеристик;
5. Разработать модуль многоэлементного сцинтилляционного экрана и измерить его параметры.

### **Научная новизна работы**

Впервые создан детектор жестких гамма-квантов для проведения рентгенографических исследований с малым поперечным размером кристалла и большим количеством каналов с индивидуальным чтением.

Впервые в детекторе жестких гамма-квантов для проведения рентгенографических исследований реализован метод съема света с тяжелого сцинтиллятора с большим коэффициентом преломления при помощи спектросмещающих волокон.

Созданы уникальные фотодиодные линейки, оптимизированные для работы с волоконной оптикой.

### **Личный вклад автора**

Автор диссертации принимал определяющее участие в получении выносимых на защиту результатов. Им лично проведены расчеты, моделирование и измерение характеристик элементов детектора, созданы стенды на основе импульсного лазера и импульсной рентгеновской трубки. Для данных стендов разработаны методики проведения экспериментов. Также разработаны методики измерения характеристик элементов детектора для стенда с использованием кремниевых фотоумножителей и стенда с использованием рентгеновской трубки, работающей в непрерывном режиме. Подготовка к публикации полученных результатов работы проводилась при совместном обсуждении с соавторами. Авторский вклад соискателя в статью [1] заключается в обосновании необходимых функциональных возможностей и точностей измерений проводимых исследований для автоматизированного многофункционального стенда для массового сбора характеристик PIN-фотодиодов и проверке соответствия полученных параметров стенда и испытуемых PIN-фотодиодов техническим требованиям. Личный вклад соискателя в статью [2] заключается в подготовке и проведении экспериментов по оптимизации светового сбора и исследованию параметров регистрирующего элемента с косвенным съемом сигнала, обработке полученных результатов. Авторский вклад соискателя в статью [3] заключается в активном личном участии в измерениях плотности энергии излучения импульсного рентгеновского источника, при этом соискателем был

обнаружен значительный вклад в плотность энергии от рассеянного излучения и разработан свинцовый экран для его устранения. Соискателем разработан и создан модуль детектора, конструкция которого является основой полезной модели, предложенной в работе [4], а также проведено детальное изучение его параметров с использованием созданных им стендов. Во всех вышеперечисленных работах авторы расположены в алфавитном порядке.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Разработан детектор для рентгенографии с рекордной эффективностью регистрации гамма-излучения с энергиями несколько мегаэлектронвольт, что позволяет изучать объекты с большей рентгеновской плотностью, чем классические системы регистрации.

Разработана и экспериментально проверена методика расчета эффективности метода косвенного съема, которая позволяет рассчитывать эффективность детекторов с другими параметрами.

Показано, что использование спектросмещающих волокон возможно с тяжелыми неорганическими сцинтилляторами, у которых высокий показатель преломления.

Произведен расчет влияния толщины защитного просветляющего покрытия на эффективность фотоприемников, который позволит оптимизировать параметры фотоприемников для различных применений.

### **Методология и методы исследования**

Методологической основой диссертационного исследования являются экспериментальные и теоретические методы исследования. Экспериментальные методы состоят в проведении измерений с использованием источников излучения в видимом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах и регистрацией полученных сигналов специализированными фотоприемниками и электронной аппаратурой. Теоретические методы основываются на статистической обработке данных и проведении моделирования методом Монте-Карло.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Комбинация тяжелого сцинтиллятора со спектросмещающим волокном позволяет создать детектор жестких гамма-квантов для проведения рентгенографических исследований с большим количеством каналов с индивидуальным чтением.
2. Разработанные методики исследования и расчетов основных элементов многоэлементного сцинтилляционного экрана – кристаллов,

спектрсмещающих волокон и оптических волокон, а также методики проверки блоков кристаллов, оптических кабелей и собранных модулей позволяют оптимизировать параметры детекторов на основе тяжелых сцинтилляторов и спектрсмещающих волокон.

3. Разработанная блочно-модульная конструкция многоэлементного сцинтилляционного экрана обеспечивает точность позиционирования модулей лучше 0,2 мм, при этом толщина корпуса вокруг чувствительной области модуля составляет 0,02 мм алюминизированного лавсана.

4. Использование отечественных кристаллов ВГО и фотодиодных линеек при разработке и изготовлении многоэлементного сцинтилляционного экрана позволяет проводить рентгенографические исследования с максимальной точностью.

5. Получены следующие характеристики детектора: эффективная чувствительная область модуля многоэлементного сцинтилляционного экрана –  $80 \pm 3\%$ , среднее регистрируемое энерговыделение от гамма-кванта с энергией 4 МэВ –  $2,58 \pm 0,02$  МэВ, флуктуации энерговыделения –  $(0,65 \pm 0,02)\sqrt{N}$  гамма-квантов, средний световой выход –  $49 \pm 6$  фотоэлектронов/МэВ. При полученных характеристиках детектора, его параметры не влияют на энергетическое разрешение, и оно определяется статистикой гамма-квантов и их взаимодействием в веществе.

6. Разработанный и созданный многоэлементный сцинтилляционный экран по своим параметрам является новым уникальным прибором, превосходящим по своим параметрам все устройства аналогичного назначения.

## **Степень достоверности и апробация результатов**

По теме диссертации опубликовано 3 научные работы, отражающих основные результаты диссертации (3 статьи – в журналах, включенных в базу данных Scopus), а также 1 патент на полезную модель.

Результаты представлялись в ИЯФ СО РАН на конкурсе молодых ученых, секция физика элементарных частиц в 2017 (3 место), 2019 (1 место), 2021 (2 место), а также на научных семинарах ИЯФ СО РАН.

Большая часть результатов работы вошла в научно-квалификационную работу аспиранта, которая успешна защищена в 2021 году.

## **Структура и объем диссертации**

Работа состоит из введения, шести глав и заключения. Первая глава посвящена методам регистрации в рентгенографии. В главах 2 – 6 описаны исследования спектрсмещающих волокон, регистрирующего элемента,

оптических волокон, фотоприемников и модуля многоэлементного экрана, соответственно. Диссертация содержит 129 страниц, 69 рисунков и 11 таблиц. Список литературы содержит 96 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проведения исследований, определена цель, сформулированы задачи, отмечена научная новизна темы исследования, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены научные положения, выносимые на защиту.

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

Рассмотрены полупроводниковые, газовые, сцинтилляционные детекторы и рентгеновские пленки. Регистрировать потоки жестких гамма-квантов с эффективностью не менее 50% позволяют только сцинтилляционные детекторы на основе элементов с высоким атомным номером. В качестве сцинтиллятора был выбран кристалл ортогерманата висмута (BGO), так как он доступен в России и обладает подходящими параметрами. Классически для обеспечения максимальной эффективности светового сбора фотоприемник располагается на торце сцинтиллятора. При этом часть ионизирующего излучения неизбежно достигает фотоприемника, что приводит к регистрации дополнительного паразитного сигнала и ухудшению энергетического разрешения. Для оценки влияния вклада ионизирующего излучения было проведено моделирование взаимодействия гамма-квантов со сцинтиллятором и веществом фотоприемника, а также оптических процессов методом Монте-Карло в GEANT 4. Результаты моделирования показали, что взаимодействие излучения с веществом фотодиода приводит к ухудшению энергетического разрешения в 2,5 раза, и флуктуации регистрируемого сигнала превышают статистический шум потока гамма-квантов. Эффект был качественно подтвержден прямым измерением. Поэтому были рассмотрены различные методы расположения фотоприемника вне области ионизирующего излучения.

Для решения этой проблемы, на текущий момент широко используется метод экран-оптика-матричный фотоприемник. Использование оптических элементов позволяет разместить матричные фотоприемники вне пучка гамма-квантов и получить изображение. Существенным ограничением данного метода является низкая эффективность сбора светового сигнала не более 1% от света, вышедшего из сцинтиллятора. При реальной геометрии световой



сбор оценивается менее одного фотоэлектрона на гамма-квант. В таком случае шум детектора будет определяться статистикой фотоэлектронов, а не гамма-квантов.

В физике высоких энергий широко применяются спектросмещающие волокна, с целью сбора светового сигнала с органических сцинтилляторов, которые имеют значительные размеры. Данный метод обладает на порядок большей эффективностью, чем метод экран-оптика-матричный фотоприемник, и позволяет разместить фотоприемники вне области ионизирующего излучения. Поэтому была предложена схема регистрирующего элемента (РЭ), показанная на рисунке 1.

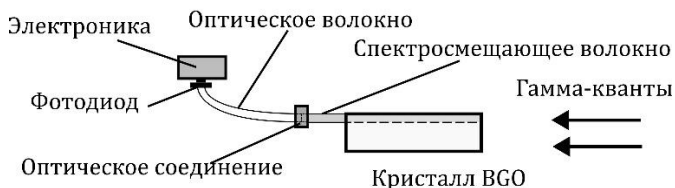


Рисунок 1 – Принципиальная схема РЭ

**Вторая глава** посвящена расчетам и экспериментам по выбору спектросмещающего волокна.

В качестве производителя волокна была выбрана фирма Kuraray, Япония. Она является мировым лидером по производству волокна с ядром из полистирола. Также фирма Kuraray обладает технологией по производству волокна с двойной оболочкой и высокой числовой апертурой, что позволяет значительно увеличить эффективность сбора светового сигнала по сравнению с волокнами других производителей.

Для исследования спектросмещающих волокон был разработан стенд на основе импульсного ультрафиолетового (УФ) лазера (рисунок 2). Принцип работы стенда заключается в том, чтобы с помощью УФ излучения возбуждать сцинтилляции в кристалле ВГО. Это позволяет исследовать регистрирующий элемент в условиях, близких к реальным. Единственным отличием является, что УФ излучение поглощается на поверхности кристалла, а жесткие гамма-кванты по всему объему кристалла.

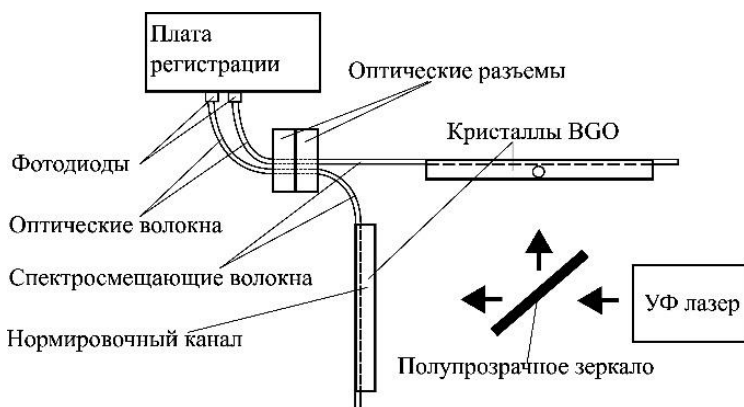


Рисунок 2 – Схема стенда на основе УФ лазера

Оптимальной спектросмещающей добавкой для волокна является фотолуминесцентный краситель, спектр поглощения которого максимально перекрывает спектр высвечивания сцинтиллятора BGO. Наиболее подходящими добавками являются красители O-2 и Y-11. Расчетные и экспериментальные исследования показали, что спектросмещающие волокна O-2 (100) MSJ и Y-11 (200) MSJ имеют одинаковую эффективность, составляющую  $2,4 \pm 0,5\%$  от прошедшего через них света. Выбрано спектросмещающее волокно O-2 (100) MSJ, так как для его спектра излучения квантовая эффективность PIN фотодиодов больше, чем для Y-11 (200) MSJ.

**Третья глава** посвящена оптимизации величины светового сбора регистрирующего элемента.

По результатам расчетов и моделирования светового сбора на поверхность волокна, только  $67 \pm 7\%$  света из сцинтиллятора попадает в спектросмещающее волокно. Расчетная эффективность светового сбора РЭ со сцинтиллятором BGO и спектросмещающим волокном O-2 (100) MSJ составляет  $1,5 \pm 0,4\%$  от светового выхода BGO.

Моделирование и измерения показали, что в случае использования спектросмещающего волокна, световой сбор не зависит от длины кристалла, и отклик на гамма-квант равномерен по его длине при длине кристаллов от 30 до 60 мм. Это позволяет значительно увеличить эффективность регистрации потоков жестких гамма-квантов за счет увеличения длины кристалла, при этом 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. На рисунке 3 показано отношение

разброса энерговыделения к среднему энерговыделению (энергетическое разрешение) в зависимости от длины кристалла.

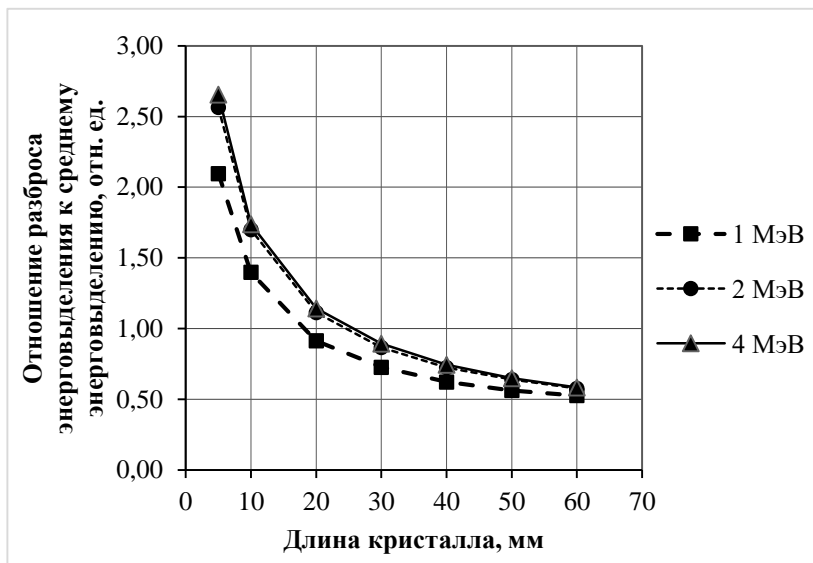


Рисунок 3 – Зависимость отношения флуктуаций энерговыделения к среднему энерговыделению от длины кристалла

Моделирование энерговыделения в кристалле и исследование зависимости светового сбора от точки высвечивания и длины кристалла показало высокую однородность светового сбора, что позволило увеличить длину кристаллов с 30 до 50 мм. Это привело к увеличению эффективности регистрации гамма-квантов с энергией 4 МэВ с 45% до 64,5%, что соответствует среднему энерговыделению  $2,58 \pm 0,02$  МэВ/гамма-квант, и уменьшило отношение флуктуаций энерговыделения к среднему энерговыделению в 1,37 раза. Дальнейшее увеличение длины кристалла нецелесообразно, так как характеристики увеличиваются незначительно, а количество брака при изготовлении кристаллов значительно возрастает.

Поперечные размеры РЭ вносят определяющий вклад в собственное пространственное разрешение детектора, а также квадратично влияют на количество элементов детектора при заданных габаритах, что определяет его стоимость. В качестве компромисса между собственным пространственным разрешением и количеством элементов, номинальные поперечные размеры одного РЭ выбраны  $4 \times 4$  мм<sup>2</sup>. В качестве светоотражающего материала выбрана тефлоновая лента, светоизолирующего материала – алюминиевая

фольга. С учетом толщины клея толщина светоотражающего и светоизолирующего покрытия составляет не более 0,1 мм. Для 100% светоизоляции на грани, на которой прорезана канавка, делается нахлест. Таким образом, на ней получается два слоя материала, что обеспечивает отсутствие зазоров в покрытии и дополнительно увеличивает прочность крепления волокна. Таким образом, размер кристаллов составляет  $3,7 \times 3,8 \times 50$  мм<sup>3</sup> (рисунок 4). Средний размер канавки выбран  $1,15 \times 1,15 \times 50$  мм<sup>3</sup>, чтобы спектросмещающее волокно размещалось в канавке с учетом точностей изготовления кристалла. В результате отношение чувствительной площади РЭ к полной составляет  $(80 \pm 3)\%$ , разброс определяется точностью изготовления кристаллов. Уменьшение размера РЭ до 4 мм, что технически сложно при использовании метода прямого съема, является одним из важнейших результатов применения метода косвенного съема, так как это позволило значительно улучшить пространственное разрешение изображения.

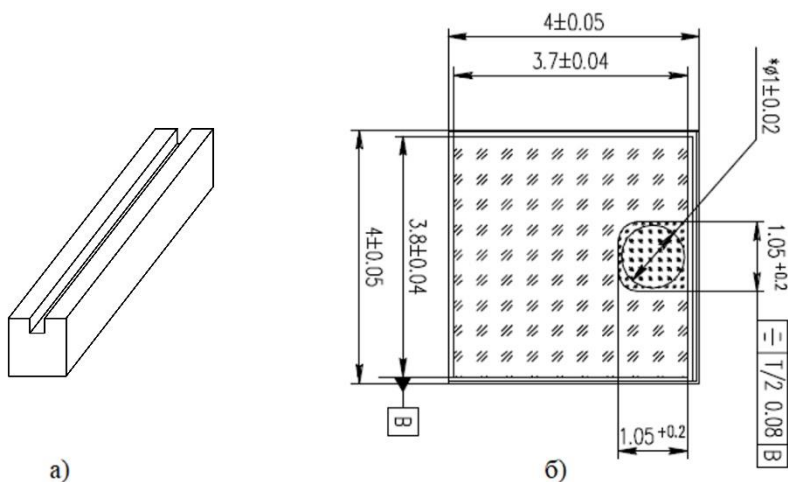


Рисунок 4 – Изображение кристалла: а) – вид кристалла с прорезанной в нем канавкой под спектросмещающее волокно; б) – чертеж сечения кристалла

Для измерения светового выхода РЭ использовалась схема, показанная на рисунке 5.

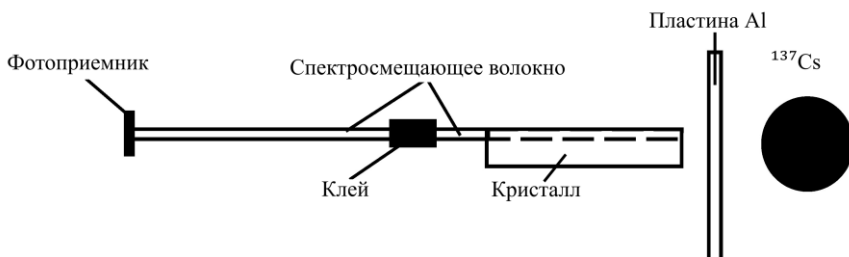


Рисунок 5 – Схема эксперимента по измерению светового выхода

Кристалл ВГО облучался гамма-квантами от радиоактивного источника  $^{137}\text{Cs}$  ( $E\gamma=662$  кэВ). Для устранения фона от бета электрона  $^{137}\text{Cs}$  между кристаллом и источником была помещена алюминиевая пластина толщиной 2 мм. В качестве фотоприемника использовался кремниевый фотоумножитель S13360-3050CS с размерами чувствительной области  $3\times 3$  мм<sup>2</sup> и размером ячейки 50 мкм. Сигналы с кремниевого фотоумножителя регистрировались анализатором импульсов DT5720 и обрабатывались специализированным программным обеспечением для этого анализатора импульсов.

Измеренный световой выход регистрирующего элемента составил  $150\pm 7$  фотон/МэВ, что хорошо согласуется с результатами расчета –  $135\pm 34$  фотон/МэВ.

**Четвертая глава** посвящена расчетам и измерениям параметров оптического волокна.

Как правило, оптические волокна массово используются в промышленности для создания коммуникационных сетей. В таких сетях для передачи информации используются лазеры либо светодиоды с малой угловой расходимостью света. Поэтому основные параметры волокон приводятся только для сигналов с малой числовой апертурой в окне прозрачности волокна. Так как информация от производителя о характеристиках оптического волокна вне окна прозрачности и потерях при полностью заполненной числовой апертуре сигнала отсутствует, использование таких оптических волокон со спектросмещающими волокнами требует дополнительного изучения.

Для исследования оптических волокон был разработан специализированный стенд (рисунок 6). Стенд позволяет поочередно подавать световой импульс в каждый канал оптического жгута, записывать его сигнал на выходе, выводить результаты на экран компьютера и составлять базу данных проверенных изделий.

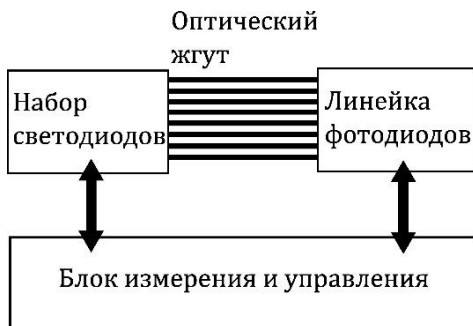


Рисунок 6 – Схема стенда для проверки оптических кабелей

Проведены расчетные и экспериментальные сравнения оптических волокон на основе полистирола Clear PS-MSJ производства Kuraray с числовой апертурой 0,72 и на основе полиметилметакрилата (PMMA) SB-1000 производства Asahi Kasei с числовой апертурой 0,6. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом (рисунок 7). 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 волокнами являются на основе PMMA с числовой апертурой 0,6.

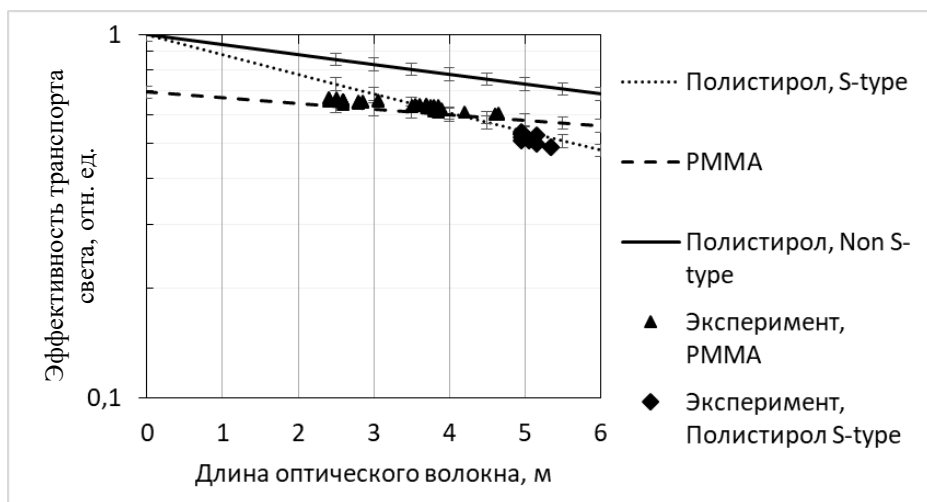


Рисунок 7 – Зависимости теоретического и экспериментального отношения выходного сигнала к входному для различных типов волокон

**Пятая глава** посвящена фотоприемникам. В этой главе описано измерение их характеристик (темновой ток, емкость, квантовая эффективность).

Проведены расчеты оптимальной толщины защитного покрытия с учетом спектра высвечивания спектросмещающего волокна и углового распределения падающего света на фотоприемник. Расчетная зависимость коэффициента отражения от толщины слоя диоксида кремния показана на рисунке 8.

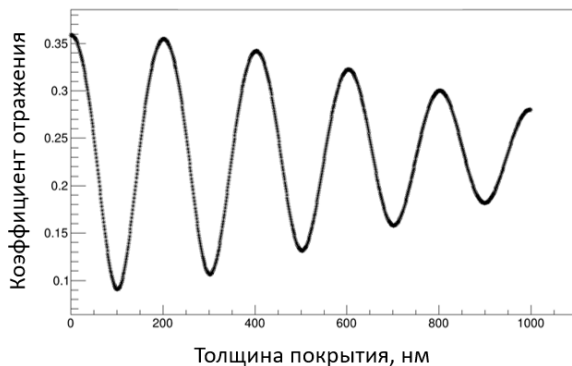


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента отражения от толщины слоя диоксида кремния

Для проведения входного контроля по темновому току и емкости разработан автоматизированный многофункциональный стенд [1]. Результаты измерения показаны на рисунках 9 и 10.

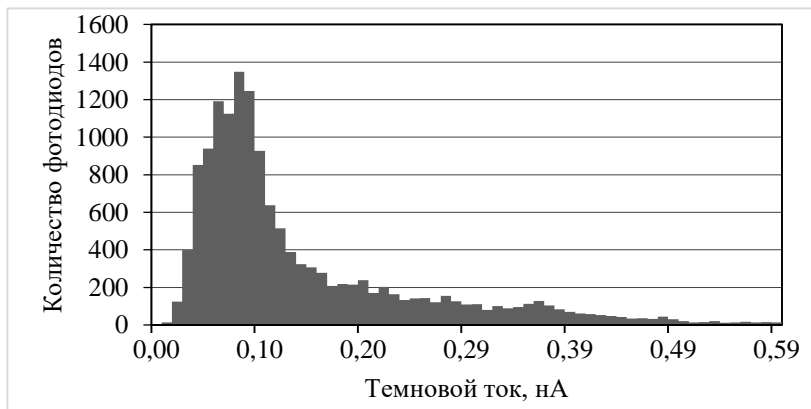


Рисунок 9 – Распределение величин темновых токов ФД

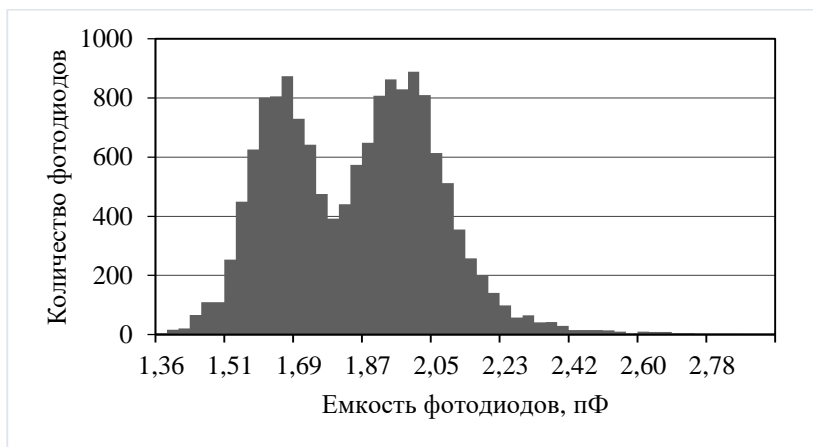


Рисунок 10 – Распределение величин емкостей ФД

Проведено сравнение отечественных многоканальных фотодиодных линеек (ФДЛ) с ближайшим по своим характеристикам ФД производства Hamamatsu – S10993-05GT. По своим паспортным характеристикам ФД Hamamatsu S10993-05GT имеет при нормальном падении света несколько лучшие параметры, чем ФДЛ. Но из-за меньших размеров и возможно неоптимизированного защитного покрытия при его использовании в МСЭ эффективность регистрации оптических сигналов будет минимум на 6% меньше, чем у ФДЛ.

**Шестая глава** посвящена разработке многоэлементного сцинтилляционного экрана. Реализована блочно-модульная конструкция МСЭ. Разработан и оптимизирован модуль МСЭ (рисунок 11).



Рисунок 11 – Модуль детектора



Для светоизоляции оптических и спектросмещающих волокон и минимизации зазоров между модулями, реализован корпус модуля со сверхтонкой стенкой вокруг сцинтилляторов из алюминизированного лавсана толщиной 20 мкм. В отличие от традиционных корпусов из металла или композитных материалов данное техническое решение обеспечивает отсутствие “мертвых зон” и рассеивающего материала между модулями. Позиционирование модулей в МСЭ осуществлено благодаря точному изготовлению деталей корпуса. Поперечные габариты корпуса имеют размеры  $64,0_{-0,2} \times 64,0_{-0,2}$  мм<sup>2</sup>, что позволяет выставить все модули МСЭ в идеальную сетку с точностью 0,2 мм. Для проверки модулей МСЭ был разработан стенд на основе импульсной рентгеновской трубки (ИРТ) (рисунок 12).

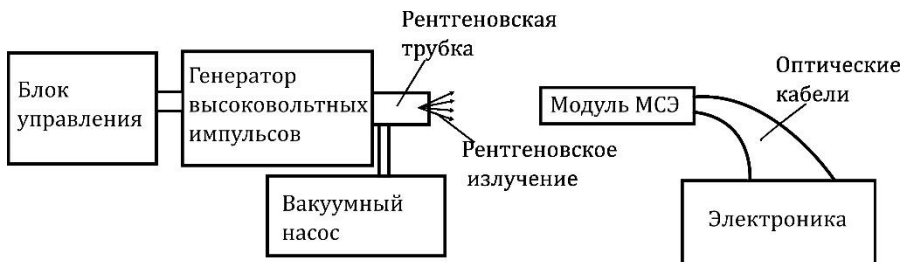


Рисунок 12 – Схема стенда для исследования модулей

Для определения светового выхода канала МСЭ была измерена плотность энергии излучения на расстоянии 1 м от анода, которая составила  $20 \pm 1$  ГэВ/см<sup>2</sup> [3]. Измеренный средний световой выход канала МСЭ составил  $49 \pm 6$  фотоэлектрон/МэВ. Полученный результат хорошо согласуется с расчетными исследованиями. При таком световом выходе энергетическое разрешение канала детектора определяется только флуктуациями энерговыделения, и составляет  $(0,65 \pm 0,02) \sqrt{N}$  гамма-квантов.

Распределение светового выхода по каналам детектора показано на рисунке 13.

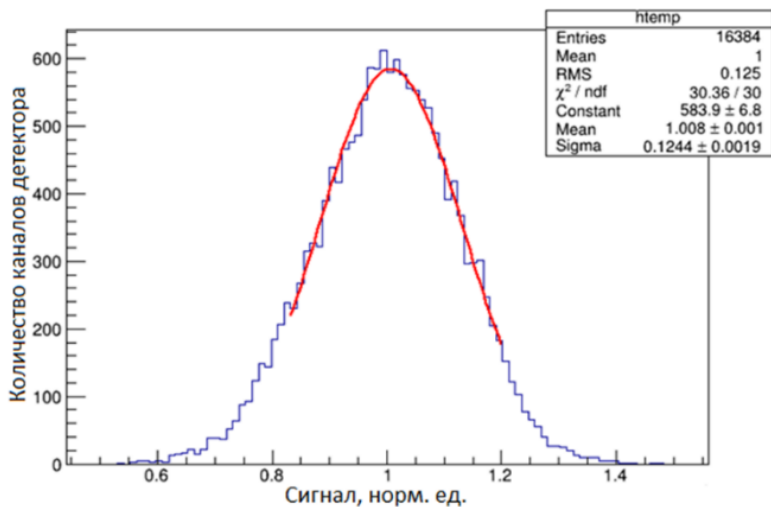


Рисунок 13 – Результаты измерений: синяя кривая – распределение светового выхода всех каналов детектора; красная кривая – функция Гаусса

По результатам выходного контроля модулей все каналы МСЭ удовлетворяют поставленным требованиям. Разброс светового выхода каналов составляет 12,5%.

В **заключении** приведены основные результаты работы и даны рекомендации к дальнейшей разработке темы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы следующие:

1. Проведены расчетные и экспериментальные исследования всех функциональных элементов МСЭ. Полученные результаты хорошо согласуются между собой. Для проведения исследований были разработаны и созданы стенды на основе импульсного лазера и импульсной рентгеновской трубки, разработаны необходимые методики проведения экспериментов. Абсолютные измерения проводились с использованием радиоактивных изотопов. На основе проведенных исследований разработан и создан многоэлементный сцинтилляционный экран для регистрации потоков жестких гамма-квантов, который по своим параметрам является новым уникальным прибором, превосходящим по своим параметрам все устройства аналогичного назначения.

2. Исследовано влияние свойств спектросмещающих и оптических волокон на световой сбор регистрирующего элемента. Для их изучения и проведения выходного контроля волокон были разработаны методики измерений и созданы специализированные стенды. Результаты исследований показывают, что оптимальным спектросмещающим волокном для кристаллов ВГО является O-2(200) MSJ, оптимальным оптическим волокном для спектросмещающих волокон O-2(200) MSJ является SB-1000.

3. Исследованы параметры опытных образцов отечественных ФДЛ. Для их изучения были разработаны специализированные стенды. С целью оптимизации квантовой эффективности ФДЛ изучено влияние толщины слоя диоксида кремния на коэффициент отражения для света, распространяющегося из оптического волокна, и определена его оптимальная толщина. Полученные результаты исследований позволили производителю улучшить параметры ФДЛ. В результате чего ФДЛ в данном устройстве имеют большую эффективность, чем возможные зарубежные аналоги.

4. Разработана блочно-модульная конструкция многоэлементного сцинтилляционного экрана. Разработанный метод съема света с тяжелого сцинтиллятора с большим коэффициентом преломления при помощи спектросмещающих волокон позволил расположить ФД вне области ионизирующего излучения, что решило проблему ухудшения разрешения из-за взаимодействия излучения в материале фотоприемников и увеличило срок службы электроники, а также упростило инфраструктуру по сравнению с прямым методом съема светового сигнала. Используемый метод значительно увеличивает чувствительность и позволяет изучать объекты с большей рентгеновской толщиной, чем стандартные системы регистрации. Также использование спектросмещающих волокон позволило уменьшить размер РЭ до 4 мм, позволило значительно улучшить пространственное разрешение

изображения, что технически сложно при использовании метода прямого съема и является одним из важнейших результатов применения метода косвенного съема.

5. Показано, 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.

6. 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. При такой величине сигнала собственные шумы электроники незначительны по сравнению с флуктуациями энерговыделения, и энергетическое разрешение определяется статистикой гамма-квантов и их взаимодействием в веществе. Были рассчитаны флуктуации энерговыделения многоэлементного сцинтилляционного экрана, которые составляют  $(0,65 \pm 0,02)\sqrt{N}$  гамма-квантов. Таким образом, тщательная оптимизация всех элементов детектора позволила обойтись без использования дорогостоящих и труднодоступных импортных сцинтилляционных кристаллов на основе лютеция и создать уникальный детектор с использованием отечественных кристаллов ВГО и фотоприемников.

В перспективе результаты работы могут быть использованы для разработки детекторов для неразрушающего контроля за исполнением сварочных и сборочных работ при изготовлении массивных конструкций, таких как мосты, объекты нефте- и газоиндустрии, для систем досмотра автомобильных фур, железнодорожных и морских контейнеров и других крупнотоннажных объектов, для современных электромагнитных калориметров в физике элементарных частиц.

Дальнейшая перспектива разработки темы состоит в создании на основе тяжелых сцинтилляторов и волоконной оптики детекторов с высоким пространственным разрешением для рентгенографических исследований.

## **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

### **В рецензируемых научных изданиях:**

1. Automated Multifunction Stand for Mass Measurement of Pin Photodiodes' Characteristics / S. S. Afanassenko, E. R. Gnatovsky, D. N. Grigoriev [et al.]. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2023. – Vol. 66, nr 1. – P. 56–59. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0020441223010013>. – Дата публикации: 26.04.2023.
2. Hard Gamma Quantum Flow Detector with Minimized Image Noise and Improved Registration Efficiency / S. S. Afanassenko, R. R. Akhmetshin, D. N. Grigoriev [et al.]. – Текст : электронный // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2021. – Vol. 57, nr 2. – P. 185–194. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S8756699021020023>. – Дата публикации: 20.08.2021.
3. Measuring the Radiation Energy Density of a Pulsed X-Ray Source / R. R. Akhmetshin, E. A. Babichev, D. N. Grigoriev [et al.]. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2019. – Vol. 62, nr 2. – P. 232–235. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0020441219020015>. – Дата публикации: 06.05.2019.

### **Патент на полезную модель:**

4. Патент № 190405 Российская Федерация, МПК G01T 1/20 (2006.01), G01T 1/202 (2006.01). Система регистрации теневых рентгеновских изображений : № 2018139916 : заявл. 12.11.2018 : опубл. 01.07.2019 / Ли Е. С., Ставриецкий Г. В., Сысков Д. В., Тимофеев А. В. ; заявитель ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина». – 8 с. : ил. – Текст : непосредственный.

Тимофеев Александр Владимирович

**Многоэлементный сцинтилляционный экран  
для регистрации потоков жестких гамма-квантов**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 03.10.2023.

Подписано в печать 04.10.2023.

Формат 60×90 1/16. Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 13

---

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринтере ИЯФ СО РАН  
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11