

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

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

Основой диссертационной работы Тимофеева А.В. является разработка новой детекторной установки для рентгенографии объектов высокой плотности. Решается задача создания детектора с большим количеством каналов с высокой эффективностью регистрации жестких гамма-квантов, а также низким уровнем собственного шума. Ключевым является вопрос вывода фотоприемников из зоны воздействия гамма-излучения, так как взаимодействие последнего с материалом фотодетектора приводит к появлению паразитного сигнала, имеющего большой статистический разброс и в конечном итоге вносящегося определяющий вклад в энергетическое разрешение установки. Дополнительно стоит также отметить задачу импортозамещения, создания детекторных элементов и компонентов с использованием и дальнейшим развитием отечественных технологий и приборов. Таким образом, можно утверждать, что **актуальность** избранной темы научной работы не подлежит сомнению, рентгенография объектов с высоким атомным номером активно применяется в интересах безопасности и индустрии.

Несомненный интерес представляет **оригинальная идея** использования технологий из физики элементарных частиц для решения вопросов рентгенографии. А именно - предложен, разработан и создан **новый уникальный** детектор, в котором светосбор с кристаллов сцинтиллятора ВГО осуществляется с помощью спектросмещающего волокна, вклеенного в канавку, в дальнейшем сигнал по оптического волокна передается на фотоприемник для регистрации, этим достигается требуемое эффективное отделение области регистрации конечного сигнала от зоны облучения жесткими гамма-квантами, приводящее к надежной защите от паразитного сигнала. В диссертационной работе представлены результаты детальных исследований различных элементов детекторной системы, общей целью которых (исследований) является увеличение эффективности

светосбора и передачи света к фотоприемникам: различных типов спектросмещающих и оптических волокон, способов размещения волокна относительно сцинтиллятора, соединения волокон между собой, светимости волокон под действием рентгеновского излучения, оптического соединения волокна и фотодетекторов. Изучены параметры опытных образцов **отечественных фотодиодных линеек**, для которых также определена оптимальная толщина защитного просветляющего покрытия, показано, что в реальных условиях использование отечественных приборов предпочтительнее их зарубежных аналогов, удается получить большую эффективность регистрации фотонов. Подчеркнем, что в качестве сцинтилляторов также применяются **отечественные кристаллы BGO**.

Представленные в работе результаты хорошо проработаны, основываются на данных моделирования, расчетов, а также непосредственно экспериментальных измерениях на специально разработанных и созданных стендах с импульсным лазером и импульсной рентгеновской трубкой, осуществлена кросс-проверка различных оценок параметров детекторов и их отдельных элементов. Можно сделать вывод о **несомненной достоверности и хорошей обоснованности** выносимых на защиту положений.

Четко показан определяющий вклад автора в успешное решение поставленных в работе задач. Материалы диссертации **прошли апробацию**, так, по теме опубликованы 3 научные статьи в журналах, входящих в базу данных Scopus. Результаты успешно представлялись на конкурсах работ молодых ученых ИЯФ СО РАН, где были отмечены заслуженными наградами, а также на научных семинарах.

Не вызывает сомнений практическая ценность выполненной работы. Разработан и создан многоэлементный сцинтилляционный экран для рентгенографии с эффективностью регистрации $\approx 65\%$, для светосбора оптимальным показано использование волокна O-2(200) MSJ, а в качестве оптического волокна - SB-100. Для **предложенного и впервые реализованного** для задач рентгенографии **метода косвенного съема сигнала** с тяжелого неорганического сцинтиллятора с большим коэффициентом преломления с помощью спектросмещающего волокна показано отсутствие зависимости от длины кристалла в диапазоне от 20 до 60 мм, что с учетом технологии изготовления позволило увеличить длину кристалла до 50 мм, существенно повысив эффективность регистрации гамма-квантов, также метод позволил уменьшить размер регистрирующих элементов до 4 мм, таким образом получить высокое пространственное разрешение изображения исследуемого объекта, что технически сложно при использовании метода прямого съема. Большую ценность представляет богатый материал экспериментальных данных по различным элементам

детектора, который может быть использован в качестве справочного для дальнейших разработок и расчетов различных модулей на основе метода косвенного съема, сама предложенная и экспериментально проверенная методика расчетов параметров детекторов составляет существенную значимость полученных результатов. Интерес для дальнейшего применения представляют разработанные и использованные в работе экспериментальные стенды. Отдельно стоит отметить успешное взаимодействие с производителем фотодиодных линеек, в результате которого последний смог улучшить параметры устройств.

В перспективе результаты работы могут быть применены для создания эффективных детекторов для неразрушающего контроля исполнения различных технологических процессов: сварочных и сборочных работ при изготовлении массивных конструкций, таких как мосты, объекты газо- и нефтеиндустрии, а также для систем досмотра крупнотоннажных объектов, для современных калориметров для нужд физики элементарных частиц, а также оборонных задач.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы. Работа содержит 129 страниц, 69 рисунков и 11 таблиц. Библиография включает 96 наименований. Структура работы логически обоснована, изложенный материал иллюстрирован достаточным количеством графиков, таблиц и рисунков.

Во введении обоснованы актуальность и важность проведенного исследования, четко определена цель, сформулированы задачи для решения, их новизна, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, а также представлены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор методов и приборов, которые используются в рентгенографии, а также детекторах ионизирующих частиц. Рассмотрены рентгеновские пленки, полупроводниковые, газовые, сцинтилляционные детекторы, описаны области и особенности применения.

В этой главе показано, что для регистрации жестких гамма-квантов с эффективностью не менее 50% необходимо использование сцинтилляторов на основе элементов с высоким атомным номером. Обоснован выбор кристаллов ВГО, которые производятся в России и обладают параметрами, подходящими для решения поставленной задачи. На основе моделирования и также непосредственными измерениями обусловлена необходимость выноса фотоприемника из области излучения для существенного увеличения энергетического разрешения. Выделены проблемы широко используемого для этих целей метода экран-оптика-матричный фотоприемник, предложен

новый оригинальный метод решения задачи - регистрирующий элемент на основе кристалла BGO со спектросмещающим волокном для светосбора.

Вторая глава описывает расчеты и эксперименты по выбору спектросмещающего волокна.

Были выбраны волокна фирмы Kuraray, Япония. Для исследования волокон был разработан и использован стенд на основе импульсного ультрафиолетового лазера. Были также выполнены расчеты на основе паспортных данных волокон, проведена проверка результатов расчетных оценок. Обоснован выбор нанесения зеркальной поверхности на торец волокна, а также расположения волокна по отношению к кристаллу. В качестве оптимального выбрано спектросмещающее волокно O-2 (200) MSJ, размещенное в канавке.

Третья глава посвящена оптимизации величины светосбора регистрирующего элемента, расчетным и экспериментальным исследованиям конструкции и других параметров элемента.

Здесь показано, что общая эффективность светосбора составляет 1.5% от общего световыхода BGO, что важно учитывать для проектирования в дальнейшем подобных устройств. В случае применения волокна световой отклик равномерен в диапазоне от 20 до 60 мм, что позволяет значительно увеличить эффективность регистрации потоков жестких гамма-квантов за счет увеличения длины кристалла, при этом оптические характеристики канала не ухудшаются - показано увеличение эффективности регистрации до ≈65%.

Проведено моделирование энерговыделения в кристалле для различных длин, обоснован выбор конечных размеров кристаллов с канавками для размещения волокон, уменьшение размера регистрирующего элемента до 4 мм является одним из важнейших результатов метода косвенного съема, разработке и применению которого посвящена работа. Также представлены измерения с радиоактивным источником, показано согласие с расчетами, что обосновывает применимость последних.

В **четвертой главе** представлены расчеты и экспериментальные измерения параметров оптического волокна, используемого для передачи света от спектросмещающих волокон к фотоприемникам. Для проведения измерений был разработан специализированный стенд. Показано, что в случае длинных оптических волокон более 4 м оптимальным является использование волокон на основа ПММА, так, выбраны волокна SB-1000.

Пятая глава описывает исследования фотоприемников для нового детектора. Представлены измерения их характеристик: темновой ток, емкость, квантовая эффективность.

Проведены расчеты оптимальной толщины защитного просветляющего покрытия слоем диоксида кремния, выбрана толщина 300 нм.

Для осуществления входного контроля по темновому току и емкости разработан еще один экспериментальный стенд.

Проведено сравнение отечественной многоканальной линейки кремниевых PIN фотодиодов с ближайшими по своим характеристикам зарубежными аналогами, показано, что для предлагаемой в работе установки оптимальным является использование именно отечественных приборов, которые полностью удовлетворяют предъявляемым требованиям и в реальных условиях превосходят аналоги.

Шестая глава посвящена разработке конечного многоэлементного сцинтилляционного экрана (МСЭ) для рентгенографии массивных объектов пучком жестких гамма-квантов. Реализована блочно-модульная конструкция экрана. Реализован корпус модуля со сверхтонкой стенкой из алюминизированного лавсана, это техническое решение позволяет избавиться от «мертвых зон» в детекторе, а также рассеивающего материала, добиться высокой точности позиционирования. Для проверки модулей разработан и успешно использован стенд на основе импульсной рентгеновской трубки. Представлены измерения световых выходов детекторов, проверено согласие с расчетами. Средний световой выход канала МСЭ составил около 50 фотоэлектрон/МэВ, при таком выходе энергетическое разрешение определяется только флуктуациями энергосвечения.

В **заключении** представлены основные результаты работы, показана их актуальность, новизна, практическая значимость, области непосредственного практического использования наработок, направления дальнейшей разработки темы.

Содержание диссертационной работы **соответствует паспорту научной специальности 1.3.2**. Приборы и методы экспериментальной физики в области исследования «Разработка и создание научной аппаратуры и приборов для экспериментальных исследований в различных областях физики» (п. 3 паспорта специальности).

Результаты работы представлены в **трех публикациях** в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России, показан во многом определяющий и основной вклад автора диссертации в опубликованные материалы. Также получен патент на полезную модель.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

Несмотря на высокий уровень полученных научных и прикладных результатов, считаю необходимым сделать несколько замечаний по рассматриваемой диссертационной работе:

1. Заявленные результаты безусловно значимы и во многом передовые, однако, например утверждение о получении рекордной эффективности регистрации гамма-квантов требует пояснений, так как кристаллы достаточной длины не являются принципиально новым достижением, также могли применяться в установках с другим методом светосбора. Новым является именно успешное применение метода светосбора со спектросмещающим волокном, что в сумме позволило получить эффективную и технологически оптимальную конструкцию. Здесь также можно отметить заявление, например, о разработке уникального оптического соединения оптоволокну и фотоприемника, в самой работе обосновано использование воздушного зазора между приемником и волокном, а также проведены измерения толщины кремниевой пластины - вопрос уникальности конструкции остается нераскрытым.
2. В работе подробно исследованы различные детекторные элементы, что представляет интерес также в качестве справочного материала для будущих разработок. Однако, наряду с этим некоторые параметры не исследованы, хотя экспериментальные возможности для этого были: влияние отражателя, в данном случае была выбрана тефлоновая лента, чем обоснован выбор? чем вызвано отсутствие рассмотрение других отражателей? на величину собираемого света. Исследование отражателя на конце волокна: сравнивалось полированное волокно и волокно с отражателем, полированное волокно тоже уже отражает свет, было бы интересно провести исследования со «скошенным» торцом для подавления отражений.
3. В работе ставится задача разработки детектора с единственной целью получения эффективности регистрации гамма-квантов не ниже 50% и низким уровнем собственного шума, далее, однако, в работе также упоминаются требования по временному отклику, плюс требования по пространственному разрешению, хотелось бы более четкого описания поставленной технической задачи, что определяет требования к детекторным элементам.
4. В работе на разных этапах и стендах при измерениях использовались различные фотоприемники, производилась оптимизация элементов в том числе с учетом их (приемников) спектральной чувствительности и эффективности, не очень понятно на какой конкретно прибор в каждом случае идет оптимизация, представляется, что это должен быть вариант, предлагаемый для конечной реализации детектора. Также стоило бы

подробнее объяснить выбор требований к величине темнового тока, емкости приборов. Также не очень ясно использование «классического» детектора для определения эффектов при прямом съеме, что за прибор использовался? Упоминается, что используется шероховатая канавка, что это значит конкретно при моделировании и расчетах? В главе 3 указано, что не учитывается отражение света от волокна, однако, в главе 4 упоминается, что величина потерь может составить около 10% для волокно-воздух, представляется, что соответствующий учет повлияет на результаты главы 3, правда, конечно, не на конечный выбор оптимальной конфигурации с вклеенным волокном.

5. Когда показываются результаты проверки распределения приборов, элементов по исследуемому параметру, представляется желательным показывать на гистограммах бин, соответствующий области за пределами представленной на гистограмме.
6. Несколько странным выглядит выполнение моделирования, например, определяется энергосодержание в кремнии, а далее пересчитывается с учетом средней энергии рождения пары, используемый генератор позволяет непосредственно показать число и тип всех интересующих процессов.

Стоит отметить, что указанные недостатки ни в коей мере не снижают общей высокой значимости выполненной работы, ее конкретной практической и научной пользы, общего положительного впечатления от диссертации. Научная и практическая задача была поставлена и успешно решена. Применена технология из физики элементарных частиц для решения вопросов рентгенографии, разработан новый прибор с превосходными характеристиками, во многом базирующийся на отечественных составляющих, полагается, что созданные технологии получат успешное применение в широком кругу интересов безопасности, промышленности и промышленности. Оппонент благодарен Тимофееву А.В. за подробные комментарии и объяснение различных аспектов работы, предоставленные дополнительные материалы. Обсуждение текста диссертации и полученных результатов показало высокий уровень владения материалом, несомненный интерес, проявляемый автором к научному исследованию, дальнейшему развитию методов и технологий, разработанных в ходе выполнения диссертационного исследования.

Диссертационная работа Тимофеева А.В. «Многоэлементный сцинтилляционный экран для регистрации потоков жестких гамма-квантов» полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства

Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Тимофеев Александр Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Я, Измайлов Александр Олегович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Тимофеева Александра Владимировича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук

(01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц),

старший научный сотрудник лаборатории физики электрослабых взаимодействий

08 ноября 2023 г.  Измайлов Александр Олегович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук

Адрес: 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, вл. 27

Телефон: +7 (495) 850-42-48

E-mail: izmaylov@inr.ru

Подпись Измайлова А.О. заверяю

Заместитель директора ИЯИ РАН по научной работе

  