

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Филиппова Дмитрия Евгеньевича на тему «Система детектирования рентгеновского излучения на основе кремниевых фотоумножителей» по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа Филиппова Дмитрия Евгеньевича посвящена вопросам разработки и исследования детектирующего модуля рентгеновского излучения на основе кремниевых фотоумножителей (SiPM) и неорганического сцинтиллятора GAGG ($\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$, $\rho = 6.63 \text{ г/см}^3$), способного одновременно работать в двух режимах: токовом (интегральном) и счетном, с дискриминацией фотонов по энергии. В работе предложен и реализован метод поиска импульсов, получаемых при детектировании рентгеновских квантов, на непрерывной выборке оцифрованного входного сигнала, длительность которой соответствует времени сканирования. Метод также позволяет определять энергию каждого кванта по амплитуде импульса с использованием калибровочных данных. В экспериментах на производстве ООО «СКБ Медрентех» на досмотровой установке «Хомоскан» экспериментально была продемонстрирована возможность понижения дозы за одно сканирование в 6.3 раза относительно нормы, установленной СанПиН. Кроме того, показано, что чувствительность разработанного модуля находится на предельном уровне, ограниченном статистическими флуктуациями потока рентгеновских гамма-квантов.

Актуальность темы диссертационной работы связана с ростом в современном мире количества угроз террористического и экстремистского характера. Одной из мер противодействия является существенное повышение массовости проводимых процедур личного досмотра с максимальной эффективностью обнаружения запрещенных предметов и, как следствие, оставаясь максимально безопасным. Для реализации такого контроля необходимо создание новой системы проекционного рентгеновского досмотра, позволяющей уменьшить получаемую в ходе процедуры сканирования дозу до уровня, определяемого не техническими характеристиками детектирующей части установок, а физическим пределом, связанным с вероятностной природой регистрируемого излучения, прошедшего исследуемый объект.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что впервые разработан и экспериментально исследован прототип детектирующего модуля «Xcounter» для проекционной сканирующей рентгеновской системы персонального досмотра человека на основе сцинтилляционных детекторов GAGG + SiPM, который обеспечивает регистрацию отдельных рентгеновских квантов в диапазоне энергий от 20 до 140 кэВ с энергетическим разрешением 34% ($E_{\gamma} = 59.6$ кэВ) в линейном режиме до $4 \cdot 10^5$ с⁻¹. Кроме того, прототип одновременно может работать в режиме интегрирования тока для расширения динамического диапазона детектирования до уровня $\sim 3 \cdot 10^6$ с⁻¹. Также впервые разработан метод поиска импульсов, получаемых при детектировании рентгеновских квантов, на непрерывной выборке оцифрованного входного сигнала, длительность которой соответствует времени сканирования. Метод также позволяет определять энергию каждого кванта по амплитуде импульса с использованием калибровочных данных.

В практическом плане данная разработка предоставляет возможность создания систем регистрации рентгеновского излучения для различных применений: персонального досмотра человека, медицинской диагностики, дефектоскопии и материаловедения.

Достоверность результатов подтверждается хорошим согласием полученных расчетных и экспериментальных данных, а также, сопоставлением с результатами других исследований. Основные результаты работы обсуждались на международных конференциях, а также были опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы из 127 наименований. Содержит 134 страницы текста, 72 рисунка и 13 таблиц. **Во введении** обосновывается актуальность данной темы, а также формулируются цели и задачи работы. **В первой главе** автором анализируется текущая ситуация в области обеспечения безопасности и применение установок персонального досмотра с использованием проникающего рентгеновского излучения, а также делает обзор современных систем. На основе этих данных автор делает логичное заключение, что следующим шагом развития подобных систем будет переход на использование детекторов, работающих в режиме прямого счета зарегистрированных фотонов и наиболее вероятным кандидатом, являются детекторы на основе сцинтилляторов и

микروпиксельных лавинных фотодиодов. **Во второй главе** проведен анализ влияния основных параметров сцинтилляционного детектора на основе кремниевых фотоумножителей на качество рентгеновского изображения. Так, в частности, представлена зависимость квантовой эффективности детектора от дозы для токового и счетного режима работы сцинтилляционного детектора на основе сцинтилляторов CsI(Tl), GAGG и LSO, а так же двух типов фотодетекторов: SiPM и pin-диод. **В третьей главе** представлены результаты Монте-Карло моделирования детектирующей системы на основе GAGG + SiPM, работающей в счетном режиме и произведена оценка параметров детектирующей способности подобной системы по тестовым изображениям. **В четвертой главе** представлено детальное описание разработанного прототипа детектирующего модуля для сканирующей досмотровой системы и дано описание алгоритма цифровой обработки данных. **Пятая глава** посвящена вопросам калибровки детектора. Так, было показано, что разброс счета между каналами не превышает 2% после применения процедуры линеаризации. **Шестая глава** посвящена вопросам оценки технических параметров и качества изображения, полученного на досмотровой системе “Хомоскан” с использованием разработанного счетного детектора. Автором было продемонстрировано что прототип “Хcounter”, основанный на SiPM и быстром сцинтилляторе GAGG, работающий в счетном режиме с возможностью энергетической селекции, превосходит с точки зрения качества изображения эталонную установку “Хомоскан” на основе pin-фотодиода со сцинтиллятором CsI(Tl), работающую в токовом режиме. Однако в вопросе обнаружения тест-объектов в виде тонких медных проволок и одновременно при максимальной дозе на детектор, разработанный счетный детектор уступает системе на основе фотодиодов поскольку флуктуации, связанные с наложением импульсов, являются физическим ограничением, существенно влияющим на работу разработанного прототипа. Далее, на основе полученного опыта, автором формулируются способы дальнейшего улучшения характеристик разработанного детектора, а также перечисляются основные требования к его основным компонентам, выполнение которых необходимо для получения максимального качества изображения. **В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые выносятся автором на защиту.

Диссертация, в целом, производит хорошее впечатление. Необходимо отметить, что автором проделан полный путь исследования – от оригинальной идеи до реализации, а также что им продемонстрирован высокий методический и экспериментальный

уровень работы. Вместе с тем диссертационная работа не лишена ряда недостатков. Так, реализовав возможность анализа амплитуды сигнала от каждого фотона, можно было бы довести идею до конца и оценить какие параметры системы можно было бы получить, реализовав метод “оптимального взвешивания по энергии” (Energy Weighting), поскольку все существующие детекторы представляют собой его частный случай. Так обычный интегрирующий детектор получает сигнал в виде суммы, где вес каждого фотона - его энергия, счетный - вес фотонов равен единице, а идеальный - с оптимальными весами, пропорциональными энергии фотонов.

На рисунках 2.9, 2.10, 2.11 приведены результаты теоретических расчетов квантовой эффективности регистрации (DQE) счетного детектора в зависимости от дозы облучения, а на рисунке 6.18 результаты аналогичных расчетов с учетом результатов измерения реальных параметров детектора. Но на всех графиках значение DQE начинается со 100%, а не с 75% как можно было бы ожидать от детектора, у которого при шаге каналов регистрации 4 мм сцинтилляционные кристаллы имеют ширину 3 мм. В данном случае можно было провести прямое измерение данного параметра через отношение сигнал-шум и сравнить с расчетами.

В Монте-Карло моделировании на основе пакета GEANT4 был использован теоретический спектр излучения рентгеновской трубки на основе формулы Крамерса без учета характеристических линий материала анода рентгеновской трубки. В тоже время можно было использовать стандартные спектры из справочников или рассчитать их с помощью GEANT4.

Основное замечание относится к вопросу о снижении дозы именно в указанное (6.3) количество раз, поскольку он затрагивает уже область "психофизики" – способности наблюдателя обнаружить заданный объект на произвольном фоне. В представленной работе автором наглядно продемонстрировано, что при получении изображений стального клина применение разработанного амплитудного счетного детектора позволяет получить то же самое значение параметра “проникающая способность по стали” при существенно меньших дозах, чем при использовании стандартных детекторов. В тоже время, анализ изображений с тест-объектами в виде медной проволоки не показал улучшений параметров системы. Поэтому, в силу сложности и многообразия задач, стоящих перед операторами досмотровых систем, было бы более перспективно говорить об улучшении возможностей обнаружения

подозрительных предметов на досмотровых системах с новым детектором, при дозе облучения, ограниченной законодательно. Отмеченные замечания не уменьшают общую положительную оценку работы и выводы диссертации. Автореферат диссертации полностью и правильно отражает ее содержание.

Диссертация Филиппова Д.Е. на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой изложено научно обоснованное решение задачи повышения диагностических возможностей рентгеновских сканеров персонального досмотра при предельно низких дозах облучения, а предложенные решения имеют большое значение для развития современных методов регистрации в физике элементарных частиц.

Считаю, что диссертационная работа Филиппова Д.Е. полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения 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 заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики), старший научный сотрудник Сектора 3-13 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН).

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, дом. 11,

тел.: +7 383 329-40-21

e-mail: porosev@inp.nsk.su

« 16 » окт. 2020 года



Поросев Вячеслав Викторович

Подпись В.В. Поросева заверяю
Учёный секретарь ИЯФ СО РАН



Аракчеев Алексей Сергеевич