

ОТЗЫВ

официального оппонента Лубсандоржиева Баярто Константиновича, доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), на диссертационную работу Филиппова Дмитрия Евгеньевича «Система детектирования рентгеновского излучения на основе кремниевых фотоумножителей», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация Филиппова Дмитрия Евгеньевича, выполненная в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), посвящена чрезвычайно важной и актуальной проблеме современной экспериментальной физики – разработке и созданию новой системы детектирования рентгеновского излучения на основе кремниевых фотоумножителей. Такие системы используются в проекционных рентгеновских установках персонального досмотра человека (УПДЧ), позволяющей обеспечить минимальную дозовую нагрузку, величина которой определяется квантовой природой рентгеновского излучения.

В настоящее время существует насущная потребность в обеспечении высокого уровня безопасности в условиях возрастающей террористической угрозы в местах массового скопления населения, например, в общественном транспорте или на спортивно-культурных мероприятиях. Возможности существующих УПДЧ, ограниченные техническими характеристиками используемых систем детектирования и, в силу высоких дозовых нагрузок, не позволяют обеспечить массовый контроль пассажиров или населения, принимающего участие в различных массовых мероприятиях. В связи с этим, разработка и создание проекционной рентгеновской УПДЧ на основе компактных фотодетекторов нового типа – кремниевых фотоумножителей (SiPM), позволяющая снизить дозовую нагрузку до минимального уровня за счет перехода в режим счёта гамма-квантов с амплитудной селекцией, является весьма актуальной задачей.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы из 127 наименований.

Во введении сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы, обоснованы актуальность и научная новизна полученных результатов, практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, достоверность результатов и апробация работы.

В первой главе рассмотрены существующие проекционные рентгеновские установки персонального досмотра человека. Сделан обзор новых решений в детекторной части УПДЧ, указаны их преимущества и недостатки, приведены примеры исследований, проводимых другими авторами, и описаны основные принципы работы классических детекторных систем для регистрации рентгеновского излучения на основе сцинтилляционных детекторов.

Во второй главе на основе определения таких понятий, как шум-фактор детектора (ENF) и контрастное разрешение (R_c), получены важные аналитические соотношения. Эти соотношения позволяют связать характеристики кремниевого фотоумножителя (темновой счёт, коэффициент усиления, эффективность регистрации фотонов, время восстановления микроячейки и другие), сцинтиллятора (световыход, собственное разрешение, время высвечивания), полихроматичность рентгеновского излучения и особенности режимы работы с основной характеристикой сканирующих систем - квантовой эффективностью детектирования (DQE).

В третьей главе приведено описание и результаты проведенного Монте-Карло моделирования сканирующей системы на основе сцинтиллятора GAGG и кремниевого фотоумножителя с помощью пакета программ Geant4. Испытания, проведенные в процессе моделирования, используют в качестве тест-объектов структуры, соответствующие требованиям ГОСТ Р 55249-2012, при этом эффективная доза, рассчитанная по интенсивности модельного рентгеновского спектра, не превышает 0.3 мкЗв, что соответствует норме СанПиН 2.6.1.3106-13.

Для численной оценки качества полученных изображений тест-объектов автором предложен метод определения проникающей способности по стали с помощи вычисления отношения контраст-шум на стальном клине, содержащем свинцовую полосу. Этот метод позволяет сопоставить качество визуального изображения с его численной характеристикой.

В четвёртой главе подробно описывается прототип работающего в режиме счёта гамма-квантов детектирующего модуля «Xcounter» на основе сцинтиллятора GAGG и кремниевого фотоумножителя. Прототип «Xcounter» состоит из 15-элементного линейного массива сцинтилляционных сборок GAGG-SiPM, платы детекторной электроники и аналогово-цифровой системы сбора данных, управляемой разработанным автором программным обеспечением.

Важными особенностями разработанной детекторной электроники, необходимыми для ее использования в условиях регистрации рентгеновского излучения высокой интенсивности, являются стабильность рабочей точки кремниевых фотоумножителей по напряжению смещения, связь входа и выхода платы по постоянному току, а также интегрирование темновых импульсов для сглаживания формы полезного сигнала.

Кроме того, автором был разработан алгоритм обработки, включающий в себя цифровую фильтрацию формы сигнала, а также определение импульсов, соответствующих каждому отдельному гамма-кванту, с измерением их амплитуды. Данный алгоритм позволил значительно уменьшить насыщение счётной характеристики.

В пятой главе описана калибровка прототипа «Xcounter», которая заключалась в измерении двух важнейших характеристик – амплитудной-энергетической шкалы и счетной характеристики для каждого канала.

Для амплитудно-энергетической калибровки автором предложен оригинальный метод, основанный на использовании сформированного с помощью стального фильтра рентгеновского спектра. Стоит отметить, что необходимость такой калибровки была обусловлена нелинейностью сцинтиллятора GAGG в области энергий менее 100 кэВ.

Измерение счётной характеристики показало, что из-за многократных наложений сцинтилляционных импульсов в условиях высокой интенсивности падающего излучения даже при использовании алгоритма фильтрации каждый канал имеет мёртвое время, примерно равное ширине импульса, а форма счётной кривой хорошо описывается законом непродлевающегося мёртвого времени.

В шестой главе представлены результаты проведения сравнительных измерений прототипа «Xcounter» и установки персонального досмотра человека «Хомоскан» производства ООО «СКБ Медрентех».

На основе проведенного анализа полученных результатов, автор демонстрирует преимущества счётного режима работы прототипа “Xcounter” над токовым режимом, используемым в установке «Хомоскан». Одним из наиболее существенных недостатков токового режима работы является влияние послесвечения сцинтиллятора на качество изображения, что особенно заметно при резком изменении плотности сканируемого объекта и/или на его границах. В счётном режиме, при условии оптимальной фильтрации сцинтилляционных импульсов и подавлении импульсов от одиночных ячеек SiPM, этот недостаток отсутствует.

Кроме того, используя амплитудную информацию, автор вводит энергетическую селекцию, которая эффективно уменьшает влияние фоновой компоненты излучения, вызванной рассеянием на элементах конструкции сканирующей системы.

По данным сравнительных измерений проникающей способности по стали с помощью вычисления отношения контраст-шум на изображениях, полученных на прототипе «Xcounter» и установке «Хомоскан», делается вывод о возможности уменьшения интенсивности излучения, а, значит и эффективной дозы, без ухудшения качества изображения, что является существенным улучшением параметров современных коммерческих УПДЧ.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Есть в диссертационной работе и недостатки.

1. В таблице 1 на странице 24 данные по световыходам антрацена и стильбена не соответствуют общепринятым данным. Также не совсем правильные данные приведены по показателям преломления других сцинтилляторов, например для $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ – 1,8 вместо 2,05.

2. На странице 26 есть излишне, на мой взгляд, сильная фраза, что кремниевые фотоумножители обладают “ничуть не уступающими ФЭУ характеристиками”. Тогда как, если говорить о скорости счета темного тока или зависимостях параметров от температуры, как раз очень даже сильно уступают.

3. На страницах 34-35 есть неудачная фраза “пиковая структура спектра”, а также говорится об одноэлектронном спектре на рисунке 2.3, хотя на рисунке приведен многоэлектронный спектр.

4. Вызывает некоторое удивление ссылка [100], сделанная к формуле 2.13. Это хрестоматийная формула, хорошо известная из статистики последовательных каскадных процессов. Например, известный вывод этой формулы с использованием производящих функций приведен в классической книге В.И.Калашниковой и М.С.Козодаева “Детекторы элементарных частиц”.

5. На странице 68 для кремниевого фотоумножителя КЕТЕК РМ3350TS-SB0 приводится значение PDE 37% на длине волны 520 для перенапряжения 3В со ссылкой на данные компании, выпускающей эти фотоумножители. Однако при рассмотрении этих данных даже для перенапряжения 5В PDE на длине волны 520 нм несколько меньше 37%.

6. В таблице 6 на странице 50 приводится значение скорости счета темнового тока кремниевого фотоумножителя 5 МГц/мм², используемое в моделировании. Для образцов КЕТЕК РМ3350TS-SB0 это значение значительно меньше. К сожалению, в работе нет анализа того, как влияет разброс этого параметра на результаты работы.

7. Мало внимания уделяется проблеме непропорциональности отклика сцинтилляторов, лишь одно упоминание на стр.83, хотя для области энергий, где велись исследования диссертационной работы, это исключительно важный параметр.

8. В работе довольно много опечаток, грамматических и стилистических ошибок, а также жаргонизмов и неудачных выражений, например: “рентгеновское излучение, проходящее насквозь через объекты” (стр.4); “когда оружие или взрывчатка были спрятаны на теле человека или в его полостях” (стр.5); “интенсивность рентгеновского спектра” (стр.14).

Указанные выше замечания незначительны и нисколько **не умаляют** высокой научной ценности диссертационной работы. Материалы работы свидетельствуют **об очень высокой квалификации** автора. Следует отметить огромный объем и высокое качество всех работ, сделанных диссертантом. В этих работах автор ярко продемонстрировал высочайшую квалификацию уже сложившегося зрелого исследователя. Сформулированные в диссертации выводы и положения не вызывают никаких сомнений. Они все **достоверны, обоснованы** и обладают **высокой научной ценностью**. Основные результаты своевременно опубликованы в хороших, высокорейтинговых журналах и докладывались автором на международных конференциях и научных семинарах. Диссертация является **законченной** научно-исследовательской работой на актуальную тему. Полученные в диссертации результаты, несомненно, найдут применение при планировании и разработке экспериментов в различных областях фундаментальных и прикладных исследований.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Работа **соответствует всем требованиям ВАК** «Положения о порядке присуждения

ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842 (ред. 01.10.2018), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее **автор, Филиппов Дмитрий Евгеньевич, несомненно, заслуживает** присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент

Лубсандоржиев Баярто Константинович,

доктор физико-математических наук,

ведущий научный сотрудник Отдела экспериментальной физики

Лаборатории гамма-астрономии и

реакторных нейтрино.

Тел.: Моб.: 8 (916) 148-38-48, раб.: 8 (499) 135-40-63

Email: lubsand@rambler.ru

Б.К. Лубсандоржиев

02.11.2020

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт ядерных исследований Российской академии наук.

117312, Москва, В-312, проспект 60-летия октября, 7а

Подпись Б.К. Лубсандоржиева удостоверяю

Врио заместителя директора ИЯИ РАН



А.В.Фещенко