

ОТЗЫВ

**официального оппонента доктора физико-математических наук
ВОРОБЬЁВА Александра Павловича на диссертацию
СМОЛЯНСКОГО Петра Игоревича
«ИЗУЧЕНИЕ ПИКсельНЫХ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫХ
ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ МИКРОСХЕМ ТИМЕРІХ»**

представлена на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности: 01.04.01.- приборы и методы экспериментальной физики.

В настоящее время идёт бурное развитие и использование систем цифровой диагностики. На смену фотопленке и другим носителям изображения все больше приходят цифровые системы. Успех в создании систем цифровой диагностики в значительной степени определяется прогрессом в развитии твердотельных координатных детекторов (сенсоров) прямого преобразования энергии частиц в электрический сигнал, пригодных для регистрации рентгеновских лучей и гамма излучения. Среди всех полупроводниковых материалов, в настоящее время наиболее подходит для этих целей арсенид галлия (GaAs), как материал имеющий, с одной стороны, малую длину поглощения фотонов и большую ширину запрещенной зоны, а с другой стороны, хорошо развитую в России технологию промышленного производства. Однако длительное время на арсениде галлия не удавалось получить детекторные структуры с толщиной чувствительной области, достаточной для рентгеновской радиографии. Сотрудничеством российских институтов в течение нескольких лет, был разработан новый GaAs детекторный материал на базе использования уникальной технологии легирования полуизолирующего арсенида галлия атомами хрома. Созданные на этом материале детекторные структуры имеют толщину чувствительной области до 1мм, что в полной мере удовлетворяет требованиям регистрации рентгеновского и гамма излучения. Материал не имеет мировых аналогов. Применение такого GaAs материала в диагностических системах, как показали исследования российских и зарубежных ученых, позволит в десятки раз понизить дозу облучения изучаемых объектов в большинстве рентгенографических систем, получить контрастность изображения и пространственное разрешение, ранее по техническим причинам не достижимые, и тем самым повысить качество диагностики. В настоящее время в России имеется промышленная база изготовления детекторов частиц на арсениде галлия, которые по своей сути есть бескорпусные интегральные микросхемы с размерами от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. К настоящему времени развитие получила также специализированная электроника для работы с полупроводниковыми детекторами как в счётном режиме регистрации единичных фотонов и

измерения их энергии, так и в режиме суммирования энергии потоков частиц. Примером такой электроники является семейство специализированных микросхем (ASIC) Европейской коллаборации MEDIPIX, что позволяет вывести разработку диагностических систем с детекторами из арсенида галлия на уровень конкретных приложений в различных областях науки и техники.

Диссертация СМОЛЯНСКОГО Пётра Игоревича посвящена актуальной теме – разработке и систематическому исследованию гибридных пиксельных координатных детекторов на компенсированном хромом арсениде галлия со специализированными микросхемами TIMEPIX, выяснению физики работы гибридных детекторов, разработке оптимизированных конструкций приборов, выявление границ областей их применения.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографии, содержит 74 рисунка, 6 таблиц, библиографию из 60 наименований и имеет общий объём 128 страниц.

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель работы и задачи исследований, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность результатов.

Первая глава содержит анализ проблем создания координатных детекторов для современных цифровых аппаратов для рентгеновского и гамма излучения и описанию принципа работы детекторов, создаваемых на основе гибридной пиксельной технологии. Рассмотрены конструкции детекторных сборок и физические процессы преобразования энергии рентгеновского и гамма излучения в электрический сигнал для получения цифрового изображения исследуемых объектов. Дается обзор семейства специализированных микросхем MEDIPIX и описываются гибридные пиксельные детекторы, использованные для проведения исследований по теме диссертации. Показано преимущество систем с прямым преобразованием энергии квантов в электрический сигнал, сформулированы требования к полупроводниковому детекторному материалу из арсенида галлия. Проведённый в данной главе анализ существующих детекторных материалов показал, что их выбор ограничен и что для их эффективного использования необходимы исследования сенсоров совместно со специализированными микросхемами считывания сигналов, раскрывающие характеристики гибридных детекторных сборок. Показано, что к началу работы по теме диссертации отсутствовали систематические исследования гибридных пиксельных сборок с сенсорами из компенсированного хромом арсенида галлия резистивного типа и специализированных микросхем TIMEPIX.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию свойств компенсированного хромом арсенида галлия как материала для создания гибридных пиксельных детекторов с микросхемами TIMEPIX. Проводились измерения электрофизических характеристик детекторов, эффективности

сбора заряда и эффективности регистрации гамма квантов, их транспортные характеристики. Для проведения этих исследований было изготовлено пять сборок гибридного типа пиксельных детекторов и создана установка, включающая в себя экспериментальный стенд с микрофокусной рентгеновской трубкой и стенд для измерения вольт-амперных (ВАХ) характеристик сенсоров и пластин детекторного материала. Выполненные измерения подтвердили, выявленные ранее другими исследователями, закономерности поведения электрофизических характеристик сенсоров из резистивного арсенида галлия (ВАХ, удельного электрического сопротивления, эффективности сбора заряда, транспортных характеристик) от температуры, преимущество использования сенсоров из резистивного арсенида галлия по сравнению с сенсорами из высокоомного кремния, их совместимость с микросхемами MEDIPIX для эффективной работы. Используя позиционную чувствительность микросхем TIMEPIX, был разработан метод измерения транспортной характеристики величины $\mu_n \tau_n$ для электронов по площади сенсора, который позволяет контролировать качество сенсоров из резистивного арсенида галлия и проводить отбраковку гибридных сборок при изготовлении детекторных систем большой площади. В этой главе показано, что используя корректировку эффективности регистрации пикселями излучения по площади гибридной сборки можно значительно улучшить качество рентгенографических изображений.

В третьей главе диссертационной работы приводятся результаты экспериментальных исследований стабильности и температурной зависимости спектральных и счётных характеристик гибридных сборок на основе резистивного арсенида галлия и микросхем TIMEPIX при регистрации гамма и рентгеновского излучений. Для выполнения этих работ был разработан и изготовлен специализированный стенд с соответствующим программным обеспечением. Измерения, проводившиеся в течение 10 месяцев при одинаковых внешних условиях, показали высокую временную стабильность гибридных сборок для положения фотопика при проведении спектрометрических измерений с радиоактивным гамма источником по всей площади сборки. Однако в работе не обсуждается возможное изменение энергетического разрешения (т.е. ширины фотопика) гибридной сборки за такой длительный период. А оно вполне возможно. Кроме того, температурная стабильность положения фотопика измерялась в малом диапазоне температур 20-25⁰С, чтобы делать такое сильное утверждение, что исследуемые пиксельные сборки в большинстве применений не требуют температурной стабилизации. Такой же вывод сделан по результатам испытаний гибридных сборок с источником рентгеновского излучения. Всё что сказано в этой главе по стабильности гибридных сборок правильно и не вызывает сомнений только для этого небольшого диапазона изменения температуры внешней среды.

В четвёртой главе диссертационной работы приводятся результаты измерений энергетического и пространственного разрешения гибридных сборок на основе резистивного арсенида галлия и микросхем ТИМЕРІХ с различной толщиной сенсоров. Описывается разработанная при участии автора методика, позволяющая существенно улучшить энергетическое разрешение сборок.

С использованием специально созданного стенда измерены форма сигнала усилителей микросхемы ТИМЕРІХ, длительность его нарастания и спада для различных настроек параметров микросхемы. Эти результаты позволяют проводить моделирование попиксельного отклика гибридного детектора на внешнюю амплитуду при различных значениях порога и коэффициента усиления и оптимизировать работу сборки для различных интенсивностей потока фотонов.

В главе описан, разработанный при участии автора, метод выравнивания энергетических порогов для пикселей гибридной сборки, который отличается от предлагаемого разработчиками микросхемы ТИМЕРІХ. Метод основан на использовании характеристических линий радиоактивных источников, учитывает неоднородность материала сенсора по площади и позволяет на порядок улучшить среднеквадратичное отклонение значений энергетических порогов пикселей по площади гибридной сборки. Этот результат важен для улучшения качества рентгенографических изображений, т.к. позволяет добиться близкого счёта в пикселях для одинаковых энергий квантов излучения.

В главе представлен также, разработанный метод попиксельной энергетической калибровки гибридной сборки и приводится его сравнение с обобщённой по площади энергетической калибровкой. Разработанный метод учитывает разброс в коэффициентах усиления пикселей микросхемы ТИМЕРІХ и позволяет значительно улучшить энергетическое разрешение гибридной сборки в диапазоне энергий гамма квантов от 16 до 60 кэВ, в режиме одно пиксельного измерения энергии квантов. В счётном режиме работы гибридной сборки, как показано в этой главе, из-за эффекта деления заряда между пикселями невозможно получить такое же энергетическое разрешение.

Измерения пространственного разрешения гибридной сборки, полученные по измерению модифицированной функции передачи (MTF) хорошо согласуются с размерами ячеек пиксельной матрицы и близко к его теоретическому пределу, равному 9.

В пятой главе диссертационной работы приводятся результаты исследования эффекта разделения заряда, который оказывает влияние на энергетическое и пространственное разрешение гибридного детектора. Эти систематические исследования выполнены впервые на толстом сенсоре с использованием источника синхротронного излучения и микропучка с размером много меньше площади пикселя гибридной сборки. Гибридная сборка прецизионно перемещалась с шагом 10мкм относительно пучка.

Таким образом, был изучен отклик пикселей гибридной сборки в зависимости от положения микропучка. Обнаружено, что сильное влияние эффекта разделения заряда на энергетическое разрешение и пространственное разрешение гибридной сборки можно значительно минимизировать точным подбором энергетического порога при исследовании пространственного разрешения и отбором одно пиксельных событий для получения хорошего энергетического разрешения, что соответствует попаданию частицы вблизи центра одиночного пикселя.

При работе с источником синхротронного излучения впервые обнаружены эффекты влияния высокоинтенсивных потоков гамма квантов (более $2,5 \cdot 10^8$ 1/мм²с) на работу гибридной сборки. В режиме измерения энергии частиц гибридной сборкой это связано с временными характеристиками специализированной микросхемы TIMPIX, а в режиме счёта числа частиц (по-кадровый режим) с качеством материала сенсора по площади гибридной сборки (неоднородностью его по площади).

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. Актуальность и новизна полученных результатов не вызывает сомнения. Результаты опубликованы, автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы уже в настоящее время широко используются в технологии изготовления детекторов на арсениде галлия и для создания рентгенографических систем в различных прикладных разработках.

Диссертация не содержит серьёзных смысловых погрешностей, написана ясно, хорошим языком и достаточно полно отражает содержание проделанной работы.

Вместе с тем следует отметить несколько неточностей присутствующих в тексте диссертационной работы. Так в Главе 1 при рассмотрении физических принципов эффекта разделения заряда между пикселями гибридной сборки (диффузия и кулоновское расталкивание в облаке неосновных носителей заряда) не рассмотрены ёмкостные связи между пикселями детекторной сборки, которые также дают вклад в этот эффект.

Во второй главе диссертации говорится об измерении вольт-фарадных характеристик сенсоров из арсенида галлия, но результаты этих исследований в работе не представлены.

В ряде мест диссертационной работы проводится сравнение результатов испытаний гибридныхборок на арсениде галлия и на кремнии, но нигде не даётся описания какой сенсор из кремния используется.

В целом диссертация СМОЛЯНСКОГО Петра Игоревича является законченным исследованием, выполненном на хорошем уровне и свидетельствует о высокой квалификации автора. Защищаемые положения и выводы являются полностью обоснованными.

Диссертация удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на

соискание учёной степени кандидата наук, а ее автор, Смолянский Пётр Игоревич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01.- приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук
главный научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ

«28» мая 2018г г.

 А.П. Воробьёв

Подпись А.П. Воробьёва удостоверяю
Учёный секретарь НИЦ «Курчатовский институт»

  Прокопенко

Александр Павлович Воробьёв
Доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.23 – Физика высоких энергий.
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова НИЦ
«Курчатовский институт», главный научный сотрудник Отдела
экспериментальной физики
142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, дом 1
телефон: (4967) 713289
e-mail: vorobiev@ihep.ru