

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Толбанова Олега Петровича, на диссертацию Смолянского Петра Игоревича по теме: «Изучение пиксельных арсенид-галлиевых детекторов на основе микросхемы Timerix», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01— «Приборы и методы экспериментальной физики»

Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертация Смолянского Петра Игоревича посвящена теме, которая в последнее время предопределяет значительный интерес в области экспериментальной физики с использованием синхротронного излучения и создания систем радиографии нового поколения.

Актуальность избранной диссертантом темы не вызывает сомнений. В мире существует огромная проблема разработки твердотельных цифровых энерго-дисперсионных матричных детекторов для создания радиографических систем нового поколения и проведения научных экспериментов в ведущих научных центрах мира в области регистрации синхротронного излучения. Синхротронное излучение высокой интенсивности на сегодняшний день является важнейшим инструментом исследования свойств материи, звезд, строения Земли, ископаемых артефактов, биомедицинских исследований молекул, вирусов, при создании веществ с новыми свойствами. В последнее время наблюдается тенденция повышения энергии синхротронного излучения, более 15 кэВ, и использование традиционных кремниевых детекторов становится бесполезным, поскольку кремний прозрачен для этой области энергий.

Эффективной альтернативой могут стать детекторы на основе полупроводников сложного состава (бинарные, тройные и четверные соединения), которые превосходят кремний по ширине запрещенной зоны, атомному номеру и плотности. Этот концептуальный подход позволяет решить проблемы эффективности регистрации, но появляются другие проблемы. Сложные полупроводники нестехиометричны, поэтому полуизолирующие свойства достигаются компенсацией проводимости. Это неизбежно ведёт к асимметрии дрейфовой длины электронов и дырок. Реально собирается заряд одного типа (электронов), поэтому более медленные носители (дырки) могут деформировать электрическое поле чувствительной области детектора.

Использование полупроводников сложного состава и цифровых “read-out” чипов для создания матричных детекторов изображений нового поколения является значительным шагом развития твердотельных цифровых детекторов, требующих детального изучения и переосмысления. Не вызывает сомнения актуальность темы исследования и потому, что изучение теории и практики использования энерго-дисперсионных матричных детекторов находится в стартовом состоянии в мире, глобальный рынок не сформирован и ждёт прорывных технологий, способных значительно продвинуть решение сформулированной в диссертационной работе проблемы.

Общая характеристика диссертационной работы

Диссертационная работа имеет следующую структуру: Введение, Пять глав, Заключение и Список цитируемой литературы. Диссертация изложена на 128 страницах машинописного текста, содержит 74 рисунка, 6 таблиц и 60 библиографических ссылок.

Во **Введении** отмечается и обосновывается актуальность темы диссертации. Эта тема, в самом деле, важна и актуальна для нашего понимания физических явлений, происходящих в системе HR-GaAs:Cr-Timerix детекторов. Диссертант приводит во **Введении** хороший краткий обзор литературы по теме диссертации, вводящий в суть дела и подготавливающий к восприятию дальнейшего изложения результатов исследований самого диссертанта и их места в мировой научной практике. Чётко формулируются цели и задачи исследования, а также их научная и практическая значимость вместе с новыми результатами, полученными в диссертации. Приведено описание структуры работы.

В **Первой главе** достаточно полно представлен обзор литературы по принципам работы твердотельных детекторов ионизирующих излучений. Систематизированы литературные данные исследований полупроводниковых детекторов. Рассмотрены механизмы взаимодействия излучений с веществом. На основе литературных данных сформулированы основные требования к полупроводниковым сенсорным материалам и обоснован выбор HR-GaAs:Cr структур как основного материала для создания матричных детекторов нового поколения.

Во **Второй главе** представлено описание объектов исследования, рассмотрены характеристики, особенности и преимущества High Resistivity арсенида галлия (HR-GaAs:Cr), как материала для создания матричных детекторов нового поколения. В 2.1 анализируется алгоритм работы Timerix детекторов в режиме счёта единичных гамма и рентгеновских квантов. В 2.2 предложена и рассматривается работа специализированного экспериментального стенда «Калан» с микрофокусной рентгеновской трубкой для исследования характеристик GaAs:Cr-Timerix детекторов. В 2.3 приведены результаты исследования температурных зависимостей вольт-амперных характеристик HR-GaAs:Cr структур. В 2.4 изучены закономерности транспорта и сбора заряда и определен важнейший параметр – произведение $\mu_n \tau_n$ (подвижности на время жизни электронов) HR-GaAs:Cr структур в зависимости от толщины чувствительного слоя. В 2.5 рассмотрена методология прецизионного исследования и результаты температурной зависимости эффективности сбора заряда в HR-GaAs:Cr структурах. В 2.6 приведены результаты расчёта и эксперимента эффективности регистрации HR-GaAs:Cr структур. В 2.7 изучена однородность сбора заряда в многоэлементных HR-GaAs:Cr сенсорах. В 2.8 представлены выводы по главе 2.

В **Третьей главе** представлены экспериментальные результаты по изучению стабильности HR-GaAs:Cr-Timerix детекторов при изменении температуры и энергии квантов излучения. В 3.1 приведены результаты исследований временной стабильности темного фото-отклика при воздействии источника гамма-излучения Am^{241} в условиях стабилизированной температуры. В 3.2 приведены результаты экспериментальных исследований стабильности работы детекторов при долговременном облучении потоками гамма-квантами различных интенсивностей, что является ключевым свойством систем при формировании рентгеновских изображений. В 3.3 представлены результаты температурной зависимости спектральных и счетных характеристик HR-GaAs:Cr-Timerix. Показано, что работа

детекторов не требует стабилизации температуры. В 3.4 представлены результаты измерений и вычислений соотношения сигнал-шум. Показано, что экспериментальные кривые близки к Пуассоновскому пределу. В 3.5 представлены выводы по главе 3.

В Четвёртой главе представлены результаты экспериментальных исследований закономерностей энергетического и пространственного разрешения HR-GaAs:Cr-Timerix детекторов. Показаны пути управления пространственным и энергетическим разрешением детекторов. В 4.1 приведен анализ принципов управления калибровкой и работой, предельных характеристик и возможностей Timerix микросхемы. В 4.2 представлены результаты энергетической калибровки HR-GaAs:Cr-Timerix детекторов. Показано, что для получения максимально возможного энергетического разрешения в режиме Time-over-Threshold требуется проведение калибровки энергетического порога каждого пикселя и детектора в целом. В 4.3 показано, что проведение энергетических калибровок HR-GaAs:Cr-Timerix детекторов улучшает энергетические разрешения, достигаемые в детекторах с различной толщиной сенсоров и в двух режимах работы: Time-over Threshold и счета одиночных фотонов. В 4.4 представлено влияние пространственного разрешения HR-GaAs:Cr-Timerix детекторов и влияния эффекта разделения заряда на пространственное разрешение детекторов с различной толщиной сенсоров. В 4.5 представлены выводы по главе 4.

В Пятой главе представлены результаты исследования HR-GaAs:Cr-Timerix детекторов на синхротронном источнике. Установлены закономерности взаимодействия детекторов с синхротронным излучением с определением предельных характеристик. Особое место занимает изучение эффекта разделения заряда на синхротронном источнике. В 5.1 представлены результаты прецизионного эксперимента по анализу профиля чувствительности в пределах единичного пикселя с использованием монохроматического пучка фотонов с энергией 18 кэВ диаметром 10 мкм. В 5.2 представлен энергетический отклик пикселя в зависимости от положения сколлимированного пучка. Показано, что когда сколлимированный пучок (10 мкм) попадал в центр пикселя, то энергетический спектр имел практически идеальную форму нормального распределения. В 5.3 изучен эффект снижения скорости счёта фотонов в детекторах при больших потоках гамма-квантов. Высказана гипотеза, что это связано с локальным искажением электрического поля в чувствительном слое сенсора. В 5.4 представлены выводы по главе 5.

Заключение содержит перечень основных результатов работы.

Оценка научной новизны и достоверности результатов

Диссертационная работа Смолянского Петра Игоревича является целостным, самостоятельным законченным научным исследованием, отличающимся новизной значимых результатов. Следует признать чрезвычайно удачным решение диссертанта на основе большого фактического материала показать возможности использования полупроводниковых детекторов, включающие HR-GaAs:Cr матричные сенсоры большой площади, поканально сопряжённые с Timerix "read-out" микросхемами, для формирования цифрового изображения. Именно объект исследования (HR-GaAs:Cr-Timerix детекторы) является принципиальной новизной. В этом отношении диссертационную работу следует признать пионерской. Достижению важных результатов диссертационной работы способствовали правильно выбранный теоретический и эмпирический материал, верные методологические подходы,

комплексный и системный анализ исследуемой проблемы, корректные, репрезентативные данные исследований фактического и статистического материала, а также использование широкого круга источников и научных работ мирового уровня.

Научной новизной работы кроме самого объекта HR-GaAs:Cr-Timerix детекторов, следует признать также ряд важных научно-прикладных результатов:

1. Изучены закономерности предельных характеристик HR-GaAs:Cr-Timerix детекторов с толщиной сенсора до 1мм.
2. Процедура прецизионной энергетической калибровки HR-GaAs:Cr-Timerix детекторов с размером пикселя 55 мкм и толщиной сенсора до 1 мм, работающих в режиме измерения энергии, что позволило достигнуть высокого энергетического разрешения (8.7кэВ (FWHM) на 57 кэВ).
3. Измерения границ чувствительности единичного пикселя HR-GaAs:Cr-Timerix детекторов с толщиной сенсора до 1 мм является не только новым, но и уникальным экспериментом, выполненным на коллимированном (10 мкм) синхротронном пучке с энергией 18 кэВ.

Достоверность полученных результатов обусловлена четкой постановкой задач и их решением с применением широкого набора взаимодополняющих современных экспериментальных методов физики конденсированного состояния.

Практическая значимость. Диссертация представляет ожидаемый интерес не только для мирового научного сообщества, но и является ценной для практической реализации бизнес компаниями и государственными структурами и ведомствами, так как имеет системный подход и обобщает большой объём оригинальных экспериментальных результатов и концепций, полученных как самим автором, так и творческими коллективами, работающими в этом направлении. Полученные в диссертации результаты позволяют концептуально построить приёмную часть систем радиографии нового поколения.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 работах автора, в числе которых четыре статьи в журналах из перечня рецензируемых российских и зарубежных научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Содержание автореферата достаточно полно отражает содержание диссертации. Результаты диссертации прошли апробацию на Всероссийских и международных научных конференциях.

При оценке диссертационной работы следует сделать следующие замечания:

1. Рис.2.8 построен некорректно. В соответствии с выражением, приведённым на стр.44 $\rho \sim \exp(E_g/2kT)$, тангенс угла наклона характеристики $\ln\rho \sim 1/T$ даёт $E_g/2k$, откуда и определяется E_g . Поэтому характеристика должна быть построена в координатах Аррениуса, т.е. $\ln\rho \sim 1/T$ для определения E_g .
2. Стр.95, Рис.4.23, чем объясняется поведение зависимости I при смещениях 0-300В. Следуя предложенному механизму формирования размеров кластеров, связанному с диффузионным расплыванием пакета движущегося заряда, должна быть обратная зависимость. При малых значениях напряжения смещения, когда скорости неравновесных электронов, определяемые как произведение подвижности на напряжённость электрического поля, невысоки, должны сказываться в большей степени диффузионные процессы, размывающие кластер.
3. Имеются некоторые неточности в определениях, например: - на стр.21, последний абзац – сомнительна справедливость формулы для коэффициента усиления

$K=Q_{in}/C_f$, где Q_{in} – заряд, C_f – ёмкость; - Автореферат, стр.8, 2-ой абзац сверху: термин «носители электронов»; - стр.15, п.1.2 «Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом»: Рассмотрено на примере взаимодействия с атомами углерода и свинца. Более предпочтительным было бы рассмотреть взаимодействие с GaAs либо другим полупроводниковым веществом; - стр.48, рис.2.9. – путаница с обозначениями приведённых характеристик.

4. Работа написана грамотно, хорошим научным языком, хотя и присутствуют мелкие погрешности, связанные с орфографией, неправильным использованием падежей существительных и временным рассогласованием. Например: стр.44,52 последний абзац, 54–1-ый абзац, 59-п.3.2, 92-п.4.3.2, 1-ый абзац, 93, последний абзац, 97, 1-ый абзац, 98, последний абзац.

Указанные недостатки и замечания ни в коей мере не снижают научных достоинств диссертации, а скорее носят характер пожеланий на будущее. Полученные в диссертации результаты являются новыми и представляют несомненный научный интерес. Структура и логика изложения материала в диссертационном исследовании выглядят достаточно обоснованными в контексте раскрытия поставленной цели и задач исследования. Цели и задачи исследования, сформулированные автором, были вполне достигнуты. Работа написана логично, доказательно, ясным и строгим научным языком. Стиль и оформление работы не вызывают замечаний. Сильную сторону диссертации составляет разработанный автором комплекс практических исследований и рекомендаций относительно изучаемой проблемы в 4-ой главе диссертационного исследования.

Считаю, что представленная диссертационная работа Смолянского Петра Игоревича на тему «Изучение пиксельных арсенид-галлиевых детекторов на основе микросхемы Timerix», безусловно, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней «Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 №842», а сам П.И. Смолянский, несомненно, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01— «Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент: Заведующий лабораторией функциональной электроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», доктор физико-математических наук (диссертация защищена по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников), профессор

Толбанов Олег Петрович

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
тел. +7 3822529852,
E-mail: rector@tsu.ru
<http://www.tsu.ru>

Подпись О.П. Толбанова заверяю:

Дата

