

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе
Смирнова Александра Александровича
«ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ДЕТЕКТИРУЮЩИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ CdTe и CdZnTe»
представленной в диссертационный совет Д 212.263.09 при
федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего образования «Тверской государственный
университет» на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.07 – Физика
конденсированного состояния

Современные задачи развития перспективной ядерно-физической аппаратуры с малым энергопотреблением, габаритными размерами, широким диапазоном рабочих температур и высокими метрологическими характеристиками не могут быть решены без применения детектирующих структур на основе широкозонных материалов CdTe, CdZnTe. По своим конструктивным и технологическим особенностям детектирующие структуры из CdTe, CdZnTe качественно отличаются от структур старого поколения, а их изготовление предполагает существенное повышение информации о характеристиках материала, о технологических способах их обработки. При разработке новых приборов существует потребность в детальном изучении электрофизических характеристик CdTe, CdZnTe; при этом такие работы необходимо проводить комплексно, так как использование различных методик позволяет дополнять представления как об исследуемых параметрах материала, так и о процессах, лежащих в основе функционирования приборов. Конструирование современных приборов, работающих на новых разрабатываемых принципах, трудноосуществимо без применения компьютерного моделирования аппаратурного спектра или функциональных процессов в полупроводнике.

Таким образом, **актуальность** представленной к защите диссертационной работы Смирнова Александра Александровича,

посвящённой исследованию электрофизических характеристик детектирующих структур на основе CdTe и CdZnTe не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения и пяти глав, включает обзор литературы и описание объектов исследования (глава 1), рассмотрение теоретических основ методик исследования электрофизических характеристик и математической модели процесса сбора заряда и формирования спектра при облучении детектирующих структур гамма-квантами (главы 2 и 3), изложение основных результатов работы и их обсуждение (главы 4 и 5), сравнение результатов математического моделирования с измеренными спектрами и выводы, список цитируемой литературы, включающей 88 источников. Диссертация изложена на 168 страницах, включает 90 рисунков и 30 таблиц.

В **введении** диссидентом обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи работы. Показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов методология и методы исследования. Представлены основные научные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об аprobации работы, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора, структуре и объёме работы.

В первой главе (литературном обзоре) диссидент рассматривает области применения, технологии изготовления и современные требования к качеству кристаллов теллурида кадмия, необходимость улучшения их характеристик в зависимости от направлений использования. Описывает общий подход к экспериментальному исследованию и теоретической интерпретации электрофизических свойств. Указывает необходимость увеличения размеров монокристаллов, улучшения их однородности и увеличения времени жизни носителей заряда.

Сформулированные цель и задачи работы отвечают **критериям новизны**, важны для понимания влияния электрофизических характеристик на спектрометрические свойства детектирующих структур регистрирующих гамма-кванты и

способствуют созданию нового поколения ядерно-физической аппаратуры широкого спектра применения.

Во второй главе приведены данные об используемых в работе методах исследования электрофизических характеристик монокристаллов теллурида кадмия, рассмотрены методы определения подвижности с помощью времязадержки пролётной техники, ТРСГУ. Представлены приборы и оборудование для экспериментальных исследований, основанных на приведенных методах изучения электрофизических характеристик,

В третьей главе диссертации представлена разработанная математическая модель процесса сбора заряда и формирования амплитудного спектра в детекторах ионизирующих излучений при облучении гамма-квантами.

Результаты сравнения аппаратурных спектров гаммаизлучения, полученные с помощью статистического моделирования, с экспериментальными данными, полученными при измерении характеристик детектирующих структур, показали адекватность принятой модели физических процессов, описывающих поглощение энергии гамма-квантов и транспорт носителей заряда.

В четвертой главе диссидентом представлены результаты исследования электрофизических характеристик детектирующих структур на основе CdTe и CdZnTe, предложен и апробирован комплексный подход определения параметров монокристаллов CdTe и CdZnTe, включающий: разработку методики изготовления детектирующих структур для измерений на основе кристаллов и разработку комплексной методики исследования характеристик монокристаллов.

Исследования были выполнены для определения следующих характеристик кристаллов:

- электропроводность материала, ВАХ детекторов;
- подвижность носителей с помощью времязадержки методики;
- эффективность сбора носителей ССЕ и измерение параметра μ для электронов и дырок;
- спектральные характеристики фотопроводимости в диапазоне длин волн 400-1800 нм;
- зависимости фотопроводимости от напряжения.

Для разработки комплексной методики исследования по изучению электрофизических параметров использован монокристаллический CdTe и CdZnTe зарубежного и отечественного производства (ОАО «Гиредмет», ЗАО «Crystals Nord» (Россия), «Redlen Technologies Inc.» (Канада) и «Acrorad» (Япония)).

Диссертантом представлена разработанная методика изготовления детектирующих структур, включающая основные технологические приёмы и конструктивные особенности создания на кристаллах теллурида кадмия детекторов ионизирующих излучений разных диапазонов: мягкого рентгеновского - и жёсткого гамма-излучений.

Рассмотрены планарные детекторы на основе структуры металл-полупроводник-металл, планарные с барьером Шотки, детекторы с преимущественно электронным сбором заряда квазиполусферические, копланарные детекторы с электронным сбором заряда. Измерены: ВАХ, эффективность сбора и подвижность носителей заряда, спектральные характеристики фотопроводимости, глубокие центры захвата и рекомбинации неравновесных носителей заряда, спектров ТСРГУ.

Из результатов измерений температурных зависимостей проводимости следует, что энергия активации проводимости исследованных образцов находится в диапазоне 0.78-0.9 эВ. Это свидетельствует об участии в процессе компенсации глубоких уровней, закрепляющих уровень Ферми в середине запрещенной зоны и учитывая некоторое изменение энергии активации уровней после термических воздействий, можно предположить, что они связаны со структурными дефектами. В исследуемых образцах зафиксированы ловушки с энергией: (0.32-0.33) эВ (основной тип, связан с антиструктурным дефектом Te_{Cd}); центры на основе катионных вакансий: (0.19-0.23) эВ, (0.44-0.46) эВ, (0.65-0.83) эВ; дырочный центр (0.91-0.94) эВ.

В пятой главе представлены результаты экспериментального исследования характеристик спектрометра энергий ионизирующих излучений на основе CdZnTe детектора. Приведены ВАХ, спектры от источников гамма-излучения, обоснован выбор режимов работы детектора, приведены зависимости энергетического разрешения от времени формирования сигнала в спектрометрическом тракте. В рамках данной работы были измерены спектры от источников

гамма-излучения ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{57}Co , ^{133}Ba . Облучение происходило со стороны катода детекторов.

Энергетическое разрешение детектора по линиям с энергиями 31 кэВ, 81 кэВ и 662 кэВ составило 8,0; 7,0 и 24,8 кэВ, соответственно. Энергетический эквивалент уровня шума составил 6,4 кэВ. Результаты исследований всех компланарных детекторов показывают, что характеристики детекторов не уступают приведенным аналогичным характеристикам зарубежных изготовителей.

В заключении представлены основные результаты и выводы.

Практическую значимость имеет предложенная диссертантом технология изготовления детектирующих структур, позволяющая, применяя изложенную в диссертации комплексную методику отбора кристаллов, изготавливать детекторы с высоким энергетическим разрешением.

В качестве замечания хотелось бы отметить следующее: автор, обобщая преимущества детекторов на основе CdTe (CdZnTe) и отмечая прецизионность их характеристик, не приводит сведений о полупроводниковых детекторах на основе сверхчистого германия (HPGe), занимающих ведущее положение в гамма- и рентгеновской спектрометрии и обладающих значительно лучшими характеристиками, позволяющими изготавливать на их основе ППД с рекордным энергетическим разрешением.

По содержанию и оформлению диссертации можно сделать незначительные замечания, в частности, термины детектирующая структура и детектор фактически есть одно и тоже.

В целом указанные замечания и отмеченные неточности не снижают положительную оценку диссертационной работы, которая является законченной научной квалификационной работой, содержащей решение задач, имеющих важное значение для физики конденсированного состояния.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 12 печатных работах, включая 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК по соответствующей специальности. Результаты работы доложены на 18 всероссийских и международных научных конференциях.

Оценивая работу в целом, следует заключить, что в диссертации **Смирнова Александра Александровича** получены новые ценные в научном и прикладном отношении результаты, и по ним сделаны обоснованные выводы. **Достоверность** полученных результатов и **обоснованность** выводов диссертации, обеспечена высоким научно-методическим уровнем исследований – применением современных экспериментальных методов, использованием надёжных методов анализа результатов и хорошей теоретической подготовкой диссертанта.

Автореферат и публикации достаточно полно отражают содержание диссертации, которая по объёму решённых задач, актуальности достоверности, научной новизне и практической значимости отвечает критериям «Положения о присуждении учёных степеней» (п.9 – п.14) утверждённого постановлением правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013г. (с изменениями и дополнениями от 28.08.2017г.), предъявляемых высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки РФ к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, соответствует паспорту специальности научных работников 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», а её автор **Смирнов Александр Александрович** заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ

доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
АО «Научно-исследовательский институт
«Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»,
начальник лаборатории 990/3

Магдич Леонид Николаевич

Дата: 15.01.2019 г.

Адрес: 117342 Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1