

На правах рукописи

Смирнов Александр Александрович

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ДЕТЕКТИРУЮЩИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ CdTe и CdZnTe**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тверь-2018

Работа выполнена на кафедре прикладной физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тверской государственный университет» и в акционерном обществе «Институт физико-технических проблем»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Каплунов Иван Александрович,

Официальные оппоненты: **Магдич Леонид Николаевич**,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, АО «Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», начальник лаборатории акустооптики

Поликарпова Наталия Вячеславовна,
кандидат физико-математических наук,
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», доцент кафедры физики колебаний физического факультета

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук»

Защита состоится 22 февраля 2019 г. в 15.30 на заседании диссертационного совета Д 212.263.09 при ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» по адресу: 170002, г. Тверь, Садовый пер., 35, ауд. 226.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Тверского государственного университета по адресу: 170100, г. Тверь, ул. Трехсвятская, д. 16/31 и в сети Интернет на сайте Тверского государственного университета <http://dissertations.tversu.ru/>

Автореферат разослан _____ 20____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.263.09

Е.В. Барабанова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

С начала 1960-х годов начались активные попытки применения широкозонных полупроводников, таких как GaAs, CdTe, HgI₂, из которых наибольшее внимание привлек к себе CdTe (CdZnTe), как материал, предоставляющий возможность получения превосходного энергетического разрешения, в частности, это дает возможность использования материала в приложениях, где требуется разрешение отдельных близко стоящих линий (1-6 кэВ) для компактных детекторных систем [1-6]. CdTe (CdZnTe) обладает характеристиками, делающими его привлекательным для использования в исследовательских, промышленных и медицинских приложениях. Созданные в последнее десятилетие полупроводниковые детекторы на основе полупроводников (CdTe, CdZnTe, HgI₂, GaAs), позволили решить широкий ряд практических задач создания аналитических приборов экспресс-анализа состава материалов. Детекторы из этих кристаллов не требуют охлаждения до температуры жидкого азота, для обеспечения малых темновых токов достаточно малогабаритного термоэлектрического охладителя мощностью 1-4 Вт, что существенно упрощает конструкцию регистрирующих элементов аналитических приборов по сравнению с приборами, созданными на основе HPGe (особочистого германия), которые громоздки из-за использования систем охлаждения жидким азотом или электромеханических охладителей.

Монокристаллы CdTe (CdZnTe), выращенные существующими методами, обладают рядом недостатков: неоднородность микроструктуры, преципитаты, малоугловые границы, дислокации, включения Te (1-5 мкм) в виде второй фазы, низкая теплопроводность. Неоднородность материала, дефекты приводят к невозможности уменьшить размер пикселей и шаг стрипов на координатно-чувствительных детекторах, а также увеличивает рабочее напряжение смещения детекторов, наблюдается поляризация планарных CdTe детекторов. При сохранении динамики улучшения параметров кристаллов в ближайшее время их использование расширится в различных областях науки и техники: астрофизика (гамма- и рентгеновская спектроскопия); медицина (компьютерные томографы, SPECT- и PET-сканеры, костные денситометры, X-Ray и гамма-камеры); геологоразведка и metallургия (каротаж скважин, неразрушающий контроль материалов); ядерные технологии (ограничение распространения ядерных и радиоактивных материалов, контроль и паспортизация ядерных отходов).

Актуальность исследования в направлении поиска исходного материала с оптимальными полупроводниковыми (ширина запрещённой зоны $1.48\div1.5$ эВ) и электрофизическими свойствами (высокое удельное сопротивление $\sim10^{10}$ Ом·см; транспортные характеристики - подвижность и время жизни носителей - $\mu\tau_e - (3\div30)\cdot10^{-3}$ и $(1\div3)\cdot10^{-3}$ см 2 /В для CdZnTe и CdTe, соответственно) для практического применения в виде полупроводниковых детекторов и спектрометров, практического использования широкозонных неохлаждаемых полупроводниковых соединений CdTe и CdZnTe группы (A_2B_6) в РФ, обусловлена требованиями наличия высоких характеристик в жестких условиях эксплуатации, миниатюризацией детекторов и сопутствующей электроники, энергетическим микропотреблением, применением новых алгоритмов обработки спектрометрической информации. Успехи применения спектрометрических детекторов рентгеновского и гаммаизлучения на основе CdTe и CdZnTe, в изделиях для медицины, космических исследований и для экспериментов в области ядерной физики и радиационной безопасности, требуют высоких эксплуатационных характеристик детекторов, повышения их чувствительного объёма и энергетического разрешения [7].

Современные детекторы CdTe, CdZnTe по своим конструктивным и технологическим особенностям качественно отличаются от детекторов старого поколения, и их воспроизведение предполагает существенное повышение информации о характеристиках материала, о технологических способах их обработки. При разработке новых приборов существует потребность в исследовании электрофизическими характеристик CdTe, CdZnTe; при этом важно проводить такие работы комплексно, так как использование различных методик позволяет дополнять представления об исследуемых параметрах материала и о процессах, лежащих в основе функционирования приборов. Конструирование приборов, работающих на новых принципах, трудноосуществимо без применения компьютерного моделирования аппаратурного спектра или функциональных процессов в полупроводнике.

Цель настоящей работы: установление корреляции между электрофизическими параметрами исследуемых кристаллов CdTe и CdZnTe и детектирующих структур на их основе и характеристиками детекторов ионизирующих излучений.

Выбор объектов исследования обусловлен практической значимостью кристаллов и возможностью совершенствования их параметров. В соответствии с целью были поставлены следующие **основные задачи:**

1. Разработать комплексную методику и исследовать электрофизические характеристики кристаллов CdTe и CdZnTe.

2. Определить критические параметры материала, конструктивных элементов и особенностей технологии изготовления детектирующих структур (на основе кристаллов CdTe и CdZnTe), влияющих на качество детекторов и приборов.

3. Экспериментально изучить связь электрофизических характеристик с прецизионными спектрометрическими характеристиками.

4. Исследовать характеристики спектрометра энергий ионизирующих излучений на основе CdZnTe детектора.

Научная новизна

Установлено, что транспортные свойства электронов на детектирующих структурах CdZnTe выше, чем на CdTe; хорошие параметры транспортного переноса μ т e электронов на детекторных структурах CdZnTe определяются малой концентрацией глубоких и мелких центров захвата носителей. Зафиксированные в монокристаллах ловушки, влияющие на транспортные характеристики, имеют энергию (эВ): (0.32-0.33), (0.19-0.23), (0.44-0.46), (0.65-0.83); (0.91-0.94).

Разработана математическая модель процесса сбора заряда и формирования амплитудного спектра в детекторах на основе CdTe, CdZnTe при облучении гамма-квантами и выполнена ее апробация с использованием экспериментальных результатов измерений спектрометра на основе CdZnTe.

Разработана методология контроля электрофизических характеристик монокристаллов CdTe и CdZnTe, используемых для изготовления детекторов ионизирующих излучений.

Разработаны методы изготовления планарных и квазиполусферических детекторов, детекторов с p-i-n-структурами, копланарных, стриповых и пиксельных детекторов и детекторных сборок на основе CdTe, CdZnTe для промышленного применения в дозиметрах, радиометрах, идентификаторах изотопного состава, спектрометрах рентгеновского и гамма-излучения, гамма-визорах, радиационных томографах и для научных исследований.

Теоретическая и практическая значимость

Впервые в РФ проведено комплексное исследование и выявлены особенности электрофизических параметров и свойств монокристаллов CdTe, CdZnTe ведущих отечественных и зарубежных производителей. Выполнение исследований определяется потребностями атомной отрасли, медицины, различных отраслей науки и техники в широкозонных полупроводниковых детекторах с улучшенными метрологическими

свойствами и возможностью работы при температурах окружающей среды до +60°C.

Систематизация электрофизических характеристик по типам технологий изготовления детекторов, позволяет оптимально разделять применения монокристаллов: для спектрометрии, для радиометрии, для дозиметрии ионизирующих излучений разных энергий и видов частиц.

Численные значения электрофизических характеристик используются при расчете оптимальных формы и размеров детектора ионизирующего излучения на основе CdZnTe, CdTe и системы электродов для дальнейшего практического применения в спектрометрах энергий ионизирующих излучений.

Результаты работы использованы при выполнении:

- ОКР по созданию портативных средств обнаружения радиоактивных материалов (для АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон»);

- ОКР «Создание датчиков для измерительных каналов диагностики физических процессов ядерных энергетических установок на быстрых нейтронах» (для НИЯУ МИФИ);

- ОКР «Разработка современного комплекса малогабаритных радиометрических и спектрометрических приборов и рентгенфлуоресцентного анализатора состава вещества на основе детекторов из широкозонных полупроводниковых материалов CdTe, CdZnTe» (для ГК «Росатом»);

- НИОКР «Исследование возможностей построения детекторов ионизирующего излучения на основе перспективных полупроводниковых структур для диагностики физических процессов ядерно-энергетических установок на быстрых нейтронах» (для АО «СНИИП»);

- НИОКР «Разработка комплекса технических средств для измерения объемной активности инертных радиоактивных газов в выбросах предприятий ядерного топливного цикла и других ядерно- и радиационно- опасных объектов» (для НИЯУ МИФИ).

Методология и методы исследования

В работе использовалась методология комплексного исследования полупроводниковых материалов CdZnTe, CdTe с применением различных методик и средств, включающих: измерение транспортных характеристик; определение подвижности с помощью время-пролётной техники; определение параметров уровней захвата; измерение удельного сопротивления, определение объёмной и поверхностной составляющих токов утечки; исследование глубоких уровней и ловушек захвата и рекомбинации; исследования однородности; измерения электрического поля в детекторе.

Отдавалось предпочтение таким методикам исследования материала, изучаемые параметры которых непосредственно связаны с основными характеристиками детекторов или прямо влияющие на них.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель процесса сбора заряда и формирования амплитудного спектра в детекторах на основе CdZnTe и CdTe при облучении гамма-квантами, учитываяшая шумовой вклад электроники (предварительного и формирующего предусилителей).
2. Разработанная методика измерения спектральных характеристик фотопроводимости обеспечивает обнаружение и определение концентрации примесных центров в полупроводниковом материале, позволяет выявлять природу глубоких центров, изучать поверхностную рекомбинацию носителей заряда, оценивать поверхностное качество контактов при отработке технологии травления поверхности и ее пассивирования.
3. Высокая эффективность детекторов на основе монокристаллов обеспечивается электрофизическими параметрами материала в следующих пределах: удельное сопротивление 10^{10} Ом·см, транспортные характеристики (для электронов, $\mu\tau_e$): $(3\div30)\cdot10^{-3}$ для CdZnTe и $(1\div3)\cdot10^{-3}$ см 2 /В для CdTe.
4. На транспортные характеристики монокристаллов CdTe и CdZnTe основное влияние оказывает наличие глубоких ловушек и степень их заполнения.

Достоверность результатов диссертации обеспечивается проверкой теоретических положений экспериментальными исследованиями; корректной постановкой исследовательских задач; применением современных методов исследования и обработки экспериментальных результатов; апробацией на международных и всероссийских конференциях; публикациями основных результатов работы в рецензируемых центральных изданиях; использованием результатов работы на практике.

Основное содержание работы опубликовано в 12 печатных работах, включая 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

Апробация работы Основные результаты диссертационной работы были представлены на форумах и конференциях: «ИНТЕРРА-2011» (г. Новосибирск); «Современные методы и технологии ядерного приборостроения» Россия (г. Москва, ОАО «СНИИП», 2012); XIX Международная научно-практическая конференция студентов и молодых учёных «Современная техника и технологии – 2013» (г. Томск,); «Ядерное приборостроение - 2013. Аппаратурное обеспечение» (г. Москва, ОАО «СНИИП»); 9th International Workshop 2014 Strong Microwaves and

terahertz waves: sources and applications (Nizhniy Novgorod); LXV международная конференция NUCLEUS-2015 (СПб.); XIII международное совещание «Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии» (г. Санкт-Петербург, 2015).; XIII Международная конференция «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» (г. Курск, 2016); 19th World Conference on Non-Destructive Testing (Мюнхен, 2016); Международная конференция «ЯДРО-2016» (г. Саров, 2016); семинар НТЦ УП РАН (г. Москва, 2016); научно-техническая конференция АО «СНИИП» (г. Москва, 2017); VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике (г. Москва, 2017); 3-я Международная научно-практическая конференция «Физика и технология наноматериалов и структур» (г. Курск, 2017).

Работа по теме диссертации проводилась в соответствии с тематическими планами НИР, в рамках государственного контракта № Н.4х.44.90.13.1125 на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Разработка параметрического ряда детекторов рентгеновского и гамма-излучения нового поколения и технологии их создания на основе проведения комплексных исследований широкозонных полупроводниковых материалов CdTe и CdZnTe».

Личный вклад автора. Диссидентом совместно с научным руководителем проводились выбор темы, планирование работы, постановка задач и обсуждение полученных результатов. Автором самостоятельно выполнены эксперименты по исследованиям электрофизических свойств монокристаллов, исследование радиометрических и спектрометрических характеристик детектирующих структур, изготовленных из отобранных монокристаллов CdTe и CdZnTe, исследованы характеристики спектрометра энергий ионизирующих излучений на основе квазиполусферического CdZnTe детектора. Автором проведены расчеты, обработаны полученные результаты.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка литературы. Работа содержит 168 страниц основного текста, 90 рисунков, 30 таблиц, список литературы включает 88 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель исследований 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 апробации работы, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора, структуре и объёме работы.

В первой главе приведен литературный обзор по теме диссертации. Рассматриваются области применения, технологии изготовления и современные требования к качеству кристаллов теллурида кадмия, необходимость улучшения их характеристик в зависимости от направлений использования. Описан общий подход к экспериментальному исследованию и теоретической интерпретации электрофизических свойств. Указана необходимость увеличения размеров монокристаллов, улучшения их однородности и увеличения времени жизни носителей заряда.

Во второй главе приведены используемые в работе методы исследования электрофизических характеристик монокристаллов теллурида кадмия: транспортных характеристик, подвижности носителей заряда, параметров уровней захвата, удельного сопротивления, определения объёмной и поверхностной составляющих токов утечки, фотопроводимости, распределения электрического поля в кристалле, уровней и ловушек захвата и рекомбинации. Определены основные требования предъявляемые к методам исследования параметров кристаллов. Рассмотрены методы определения подвижности с помощью время пролётной техники, ТРСГУ. Для экспериментальных исследований, основанных на приведенных методах изучения электрофизических характеристик, представлены приборы и оборудование.

В третьей главе представлена разработанная математическая модель процесса сбора заряда и формирования амплитудного спектра в детекторах ионизирующих излучений при облучении гамма-квантами. Рассмотрены процессы поглощения излучения в материале детектора, фотоэлектрический эффект, комптоновское рассеяние, образование электрон-позитронной пары, ионизационные потери, сбор индуцированного заряда. Учтены различные источники флюктуации заряда. Осуществлено моделирование процесса сбора заряда и влияния электрофизических характеристик на формирование спектра в детектирующих структурах.

Расчет амплитудного спектра гамма спектрометра проводили с учетом следующих физических процессов: поглощение гамма-излучения и образование неравновесных носителей заряда в материале детектора; сбор образованного заряда в детекторе с учетом реального распределения электрического поля в объеме и формирование зарядового импульса; учет расширения спектра вследствие шумового вклада, вносимого спектрометрическим трактом вместе с детектором, статистической

флуктуации числа образуемых носителей и влияния неоднородного сбора носителей.

Осуществлено сравнение смоделированных спектров гамма-излучения с экспериментальными данными. Полученные результаты по расчету отклика детектора на основе кристалла CdTe показаны на рисунке 1а, а на рисунке 1б - сравнительные результаты по детектору на кристалле CdZnTe.

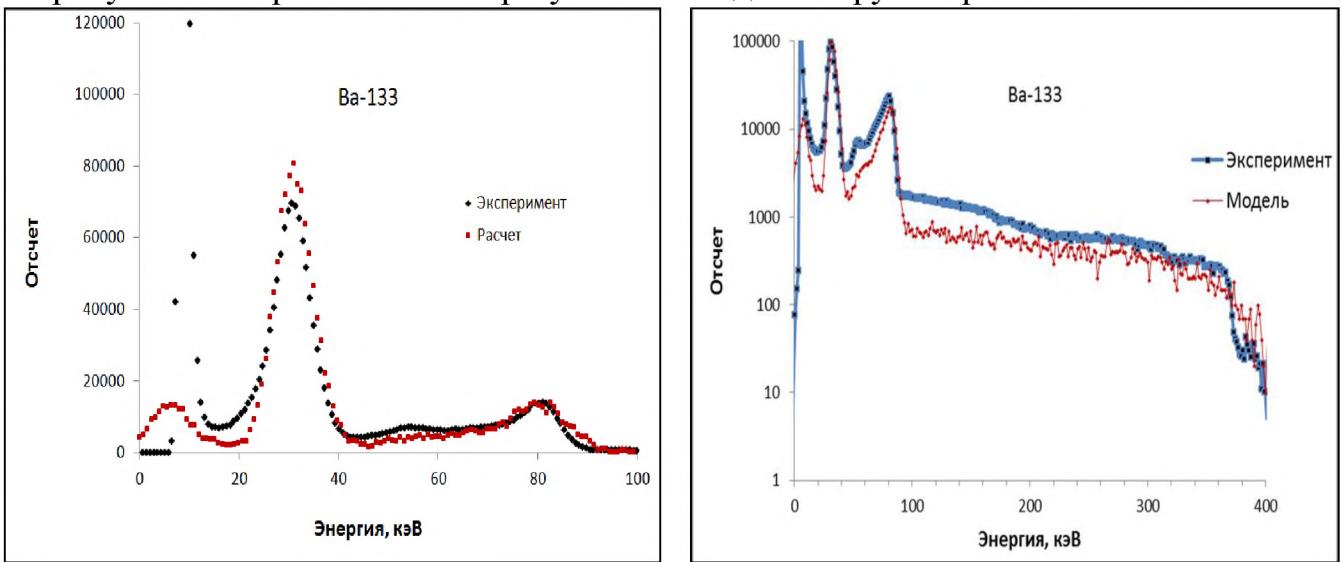


Рисунок 1. Отклик планарного детектора при облучении источником гамма-излучения ^{133}Ba : а - на основе CdTe; б - на основе CdZnTe

Результаты сравнения аппаратурных спектров гамма-излучения, 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 представлены результаты исследования электрофизических характеристик детектирующих структур на основе CdTe и CdZnTe.

В работе 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 время-пролетной 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)).

В работе 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-излучения. Из исходного кристалла вырезали прямоугольные образцы, которые затем подвергались механическим технологическим операциям и затем изготавливались контакты. Все образцы имели одинаковую кристаллографическую ориентацию – контакты изготавливали в плоскости (111). Характерные размеры конечных детектирующих структур: толщина 1-3 мм, длина и ширина 2-10 мм.

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.

Типичные зависимости ВАХ для исследуемых образцов различных производителей приведены на рисунке 2 и 3.

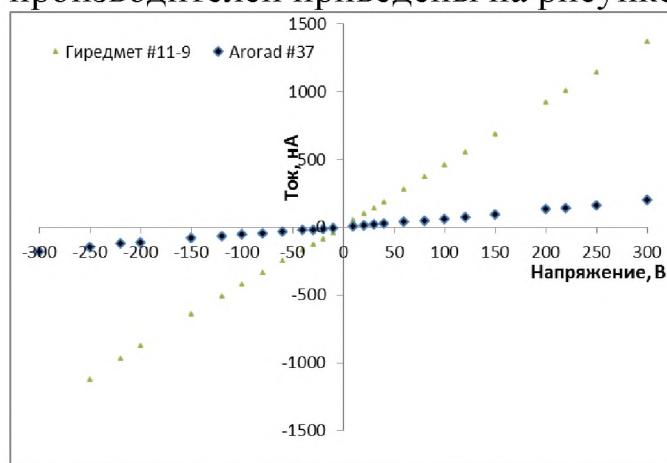


Рисунок 2. ВАХ для образцов CdTe «Acrorad» и «Гиредмет»

Вольт-амперные характеристики для указанных полуизолирующих образцов CdTe линейные и симметричные. Контакты на этих детекторах можно характеризовать как квазиомические, при этом на некоторых образцах наблюдали диодную ВАХ, что свидетельствует о выпрямляющих свойствах контактов.

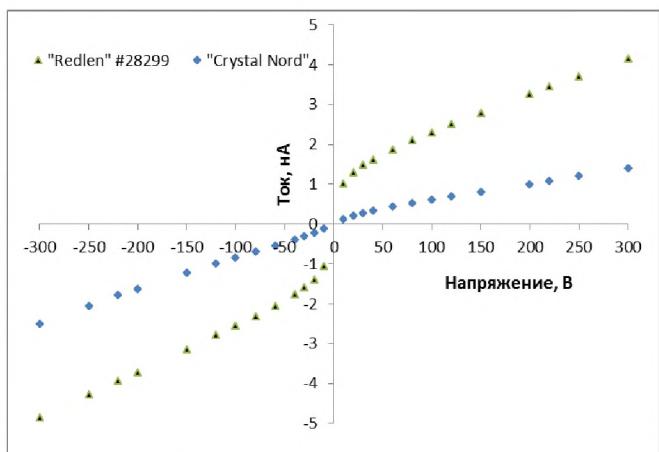


Рисунок 3. ВАХ для образцов CdZnTe «Redlen» и «CrystalsNord»

Эффективность сбора носителей заряда определялась из анализа спектров амплитудного распределения импульсов, полученных при облучении альфа-излучением при различных напряжениях. На рисунке 4 показаны типичные спектры амплитудного распределения импульсных сигналов, возникающих при облучении изотопом ^{239}Pu . Зависимости эффективности сбора неравновесных носителей от приложенного напряжения для образцов CdTe и CdZnTe показаны на рисунке 5.

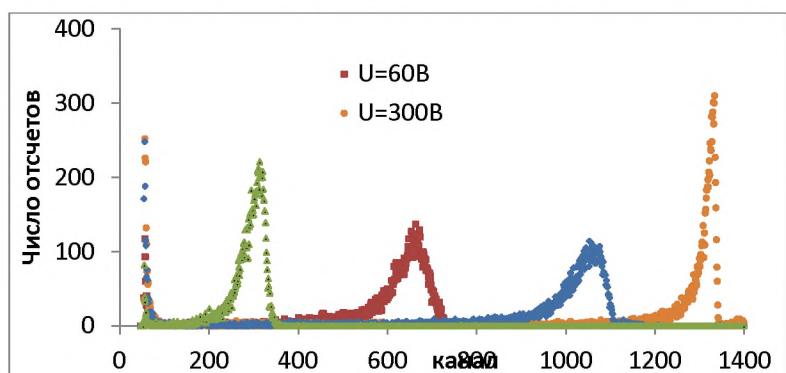
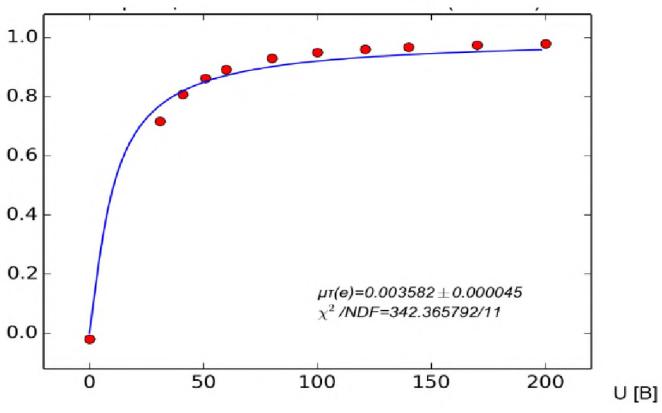
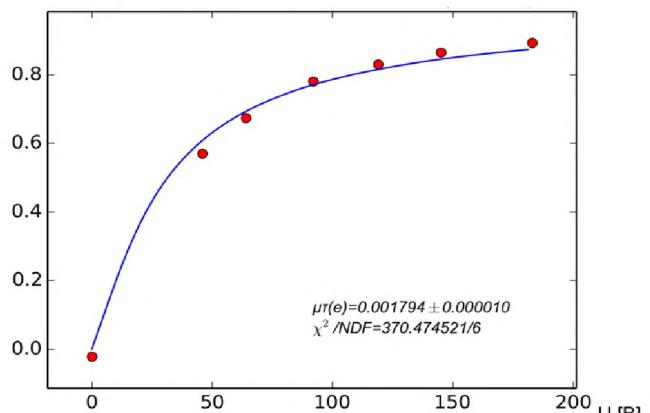


Рисунок 4. Амплитудные спектры альфа-частиц источника ^{239}Pu , измеренные на образце CdZnTe «Redlen» при различных напряжениях смещения



а



б

Рисунок 5. Зависимость ССЕ от напряжения для детекторов на кристаллах:
а -CdZnTe «Redlen»; б - CdTe «Acrorad»

Напротив, ВАХ полуизолирующих детекторов CdZnTe имеют, как правило, характеристики квазидиодов Шоттки, включенных навстречу друг другу.

Определение транспортных характеристик - $\mu\tau$ - в детекторных материалах CdTe, CdZnTe проводили путем измерения эффективности сбора заряда при облучении детектора частицами с коротким пробегом.

Вычисленные значения параметров переноса носителей заряда и для исследованных образцов CdZnTe «Redlen» представлены в таблице 1. Указаны также эквивалентный шумовой заряд (ENC) и энергетическое разрешение по линии 59,54 кэВ источника гамма-излучения Am-241.

Таблица 1. Характеристики образцов CdZnTe

№	Номер образца	$(\mu\tau)_e$, см ² /В	ENC, кэВ U = 300 В	FWHM Am-241, кэВ U = 300 В
1	13038	$6,5 \cdot 10^{-3}$	5,5	7,4
2	13043	$6,6 \cdot 10^{-3}$	7,5	8,3
3	27074	$4,9 \cdot 10^{-3}$	7,8	9,9
4	27078	$4,3 \cdot 10^{-3}$	5,7	8,1
5	27217	$4,4 \cdot 10^{-3}$		
6	28246	$6,7 \cdot 10^{-3}$	5,8	7,1
7	28251	$5,6 \cdot 10^{-3}$	5,9	7,3
8	28261	$6,4 \cdot 10^{-3}$	5,7	
9	28263	$3,7 \cdot 10^{-3}$	-	-
10	28280	$8,2 \cdot 10^{-3}$	4,6	7,7
11	28288	$5,8 \cdot 10^{-3}$	4,6	8,1
12	28299	$5,0 \cdot 10^{-3}$	4,6	6,8 (250V)
13	28308	$1,0 \cdot 10^{-3}$	-	-
14	28262	$6,7 \cdot 10^{-3}$	5,8	7,2
15	12983	$6,4 \cdot 10^{-3}$	7,3	9,3

Спектральный анализ фотопроводимости проводился при комнатной температуре в диапазоне длин волн 400-1800 нм. На облучаемые электроды прикладывалось отрицательное напряжение относительно держателя. Электроды были полупрозрачными для входящего излучения (толщина не превышала 1000 Å). На рисунке 6 представлены спектральные зависимости фототока для образцов CdTe и CdZnTe различных производителей.

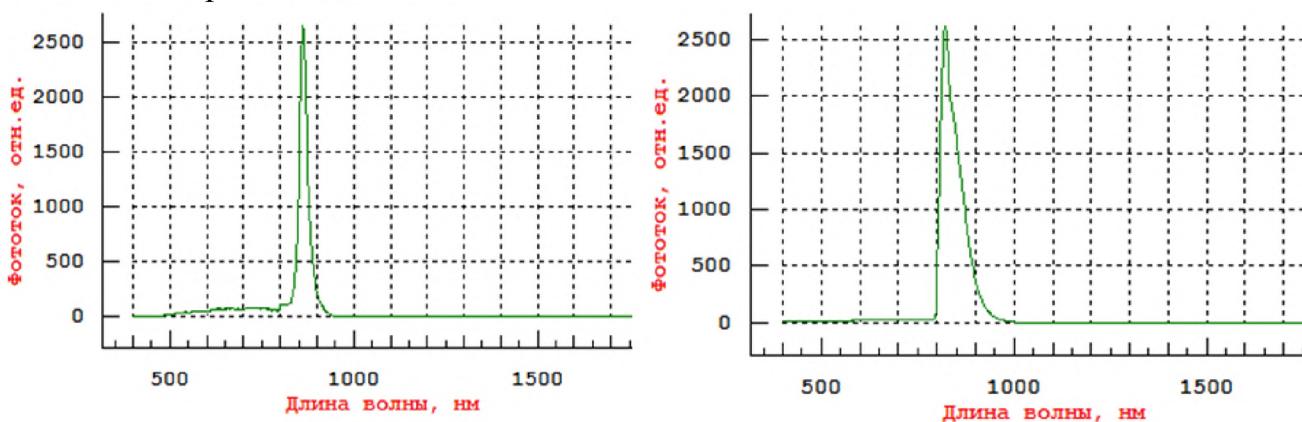


Рисунок 6. Спектральная зависимость фотопроводимости образцов:
а - CdTe («Acrorad») при напряжении U = 30 В; б - CdZnTe («Redlen») при напряжении U = 40 В

Зависимости имеют три области. Высокоэнергетическая область в диапазоне 400-750 нм с максимумом 600-700 нм связана с наличием оксидных соединений, непосредственно примыкающими к контакту. Область собственного поглощения имеет различное местоположение в зависимости от материала. Для CdTe она находится в диапазоне 820-900 нм, в то время как для CdZnTe – в диапазоне 760-840 нм. Третья область спектров 900-1500 нм связана с глубокими и мелкими уровнями, существующими внутри запрещенной зоны детектора.

Время жизни носителей и, соответственно, их транспортные характеристики – параметр $\mu\tau$, в большой степени определяются спектром глубоких уровней в запрещенной зоне. В частности, многократный захват на ловушки с последующим термическим выбросом существенно замедляет транспорт носителей заряда. Методом токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней (ТРСГУ), в котором измеряется температурная зависимость релаксации тока после заполнения ловушек импульсом света, определяли энергию термической активации ловушки и сечение захвата носителей.

Спектры ТРСГУ образца CdTe (№ 1) представлены на рисунке 7. При отрицательном смещении на верхнем электроде сигнал растет в сторону низких температур, что, по-видимому, является проявлением какой-то мелкой электронной ловушки. Спектры измерялись при смещении 10 В, чтобы среднее внешнее поле в образце было примерно одинаковым. При высоких температурах сильно растет темновой ток, что делает невозможным анализ спектров в этой области температур.

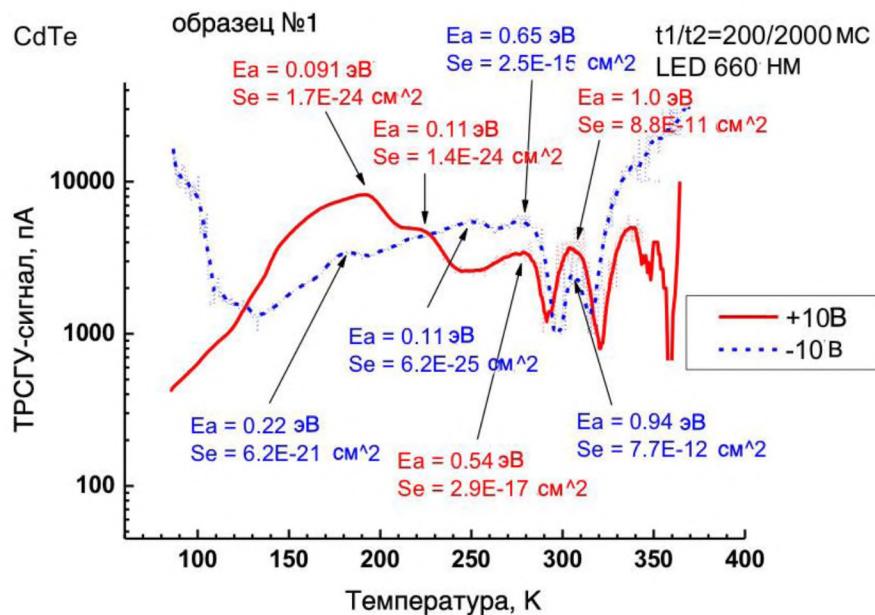


Рисунок 7. Спектры ТРСГУ образца CdTe (№ 1)

На рисунке 8 представлены спектры ТРСГУ для образца CdZnTe (№ 10), снятые при смещении ± 4 В при возбуждении коротковолновым светом 365 нм.

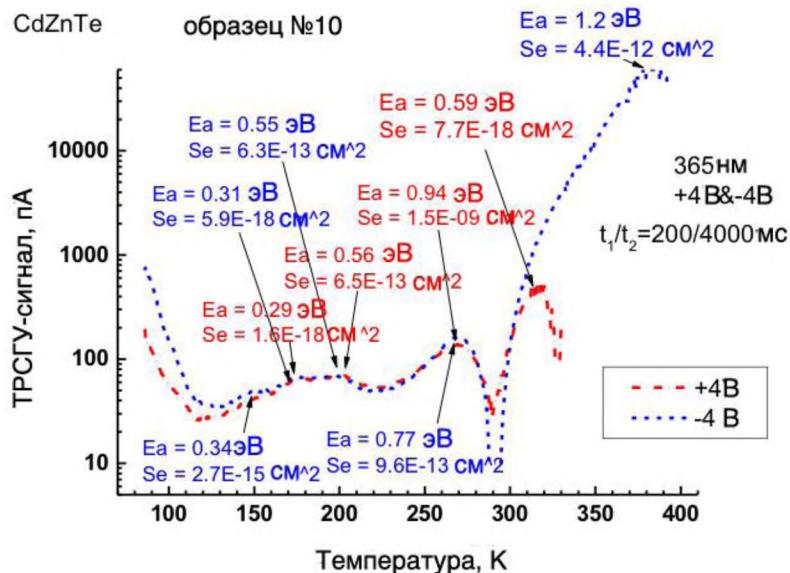


Рисунок 9. Спектры ТРСГУ образца CdZnTe (№ 10), снятые при возбуждении УФ светом

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 ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am, ⁵⁷Co, ¹³³Ba. Облучение детекторов происходило со стороны катода детекторов.

Электрические характеристики копланарных детекторов, на которых выполнялись измерения, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Электрические характеристики копланарных детекторов

Наименование измеряемой характеристики	№ 1-261 5×5×5 мм	№ 2-299 10×10×5 мм	№ 3-262 10×10×5 мм	№ 4 10×10×10 мм	№ 5 10×10×10 мм
Удельное сопротивление, Ом·см	$2,2 \cdot 10^{10}$	$7,7 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{11}$	$8,5 \cdot 10^{10}$	$5,9 \cdot 10^{10}$
Межсеточное сопротивление, ГОм	0,31	0,77	0,20	1,05	2,33
Удельное межсеточное сопротивление, ГОм·см	85,5	474	234	440	684
Ток утечки при напряжении минус 1000В, нА	9,0	7,3	5,7	4,9	5,9

На рисунке 9 приведен спектры излучения нуклидов ^{137}Cs , измеренный детектором № 1, при напряжении на детекторах 1000 В, межсеточном напряжении 50 В и постоянной времени формирования 1 мкс.

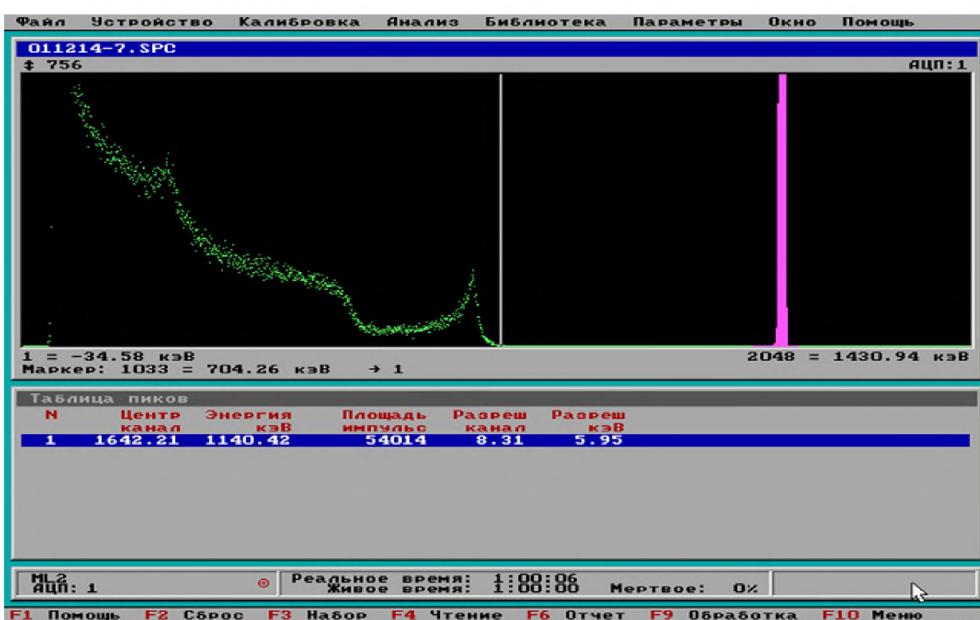


Рисунок 9. Амплитудный спектр источника гамма-излучения ^{137}Cs , измеренный детектором №1

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.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения работы разработана комплексная методика исследования характеристик монокристаллов CdTe и CdZnTe, включающая измерение ВАХ и удельного сопротивления образцов; измерение эффективности сбора и подвижности носителей; измерение спектральных характеристик фотопроводимости; создана математическая

модель процесса сбора заряда и формирования амплитудного спектра в детекторах на основе CdTe, CdZnTe при облучении гамма-квантами; экспериментально изучена связь электрофизических характеристик с прецизионными спектрометрическими характеристиками; разработан технологический блок детектирования гамма-излучения и выполнено и выполнено измерение технических характеристик изготовленных детекторов копланарной конструкции на основе CdZnTe.

Выводы:

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

2. Установлено, что для создания высокоэффективных детекторов на основе монокристаллов необходимо обеспечивать электрофизическкие параметры материала в пределах: удельное сопротивление 10^{10} Ом·см, транспортные характеристики (для электронов, $\mu\tau_e$): $(3\div30)\cdot10^{-3}$ для CdZnTe и $(1\div3)\cdot10^{-3}$ см²/В для CdTe.

3. Лучшие параметры транспортного переноса $\mu\tau_e$ электронов $(4\div7)\cdot10^{-3}$ см²/В имеют детектирующие структуры CdZnTe производства «RedlenTechnologiesInc.». Эти же детекторы обладают наименьшими токами утечки 1-10 нА (плотность тока при электрическом поле 600 В/см около 2,5 нА/см²) и удельным сопротивлением $(2\div6)\cdot10^{10}$ Ом·см. Данные образцы являются наилучшим материалом для копланарных, стриповых, пиксельных и полусферических детекторов.

4. На транспортные характеристики монокристаллов CdTe и CdZnTe основное влияние оказывает наличие глубоких ловушек и степень их заполнения. С использованием разработанной установки для измерения спектров метод токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней (ТРСГУ) зафиксированы в монокристаллах 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. Хорошие параметры транспортного переноса $\mu\tau_e$ электронов на детекторных структурах CdZnTe определяются малой концентрацией глубоких и мелких центров захвата носителей.

5. На качество детекторов и приборов на их основе влияют конструктивные элементы (величина пита, конструкция сеточных электродов, межсеточный промежуток, общее количество полос), параметры технологии изготовления детекторов (подготовка поверхности и формирование контактов), однородность монокристаллов и их

электрофизические характеристики. Измеренные спектры от источников гамма-излучения ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{57}Co , ^{133}Ba подтверждают высокое энергетическое разрешение детекторов и подтверждает важность оптимизации конструкции сеточных электродов для обеспечения однородного сбора носителей (измеренное энергетическое разрешение изготовленных экспериментальных образцов копланарных детекторов по энергии 662 кэВ (^{137}Cs) составляет 3,9-4.2%).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

- А1. Хлебников И.Б. Эволюция безазотных спектрометров γ -излучения на основе полупроводниковых детекторов из особочистого германия / И.Б. Хлебников, Г.В. Худых, А.А. Смирнов, А.А. Приладышев, А.В. Неганов, М.В. Липин, В.М. Залетин // Атомная энергия. - 2013. - Т. 114, вып. 1. - С. 29-33.
- А2. Газизов И.М. Неохлаждаемые детекторы на основе CdTe и CdZnTe для спектрометрии γ -излучения / И.М. Газизов, А.А. Смирнов, В.Г. Федорков, Ю.П. Харитонов, В.С. Хрунов, В.М. Залетин // Атомная энергия. - 2016. - Т. 121, вып. 5. - С. 285-290.
- А3. Смирнов А.А. Разработка математической модели процесса сбора заряда и формирования спектра в детекторах на основе CdTe (CdZnTe) при облучении гамма-квантами / А.А. Смирнов, И.А. Каплунов, А.А. Ольнев, А.Н. Никифорова // Физико-химические аспекты изучения кластеров,nanoструктур и наноматериалов. Тверь: ТвГУ. - 2017. - Вып. 9. - С. 465-474.
- А4. Газизов И.М. Электрофизические характеристики монокристаллов |CdTe| и |CdZnTe| для неохлаждаемых полупроводниковых детекторов ядерного излучения / И.М. Газизов, И.А. Каплунов, А.Н. Никифорова, А.А. Ольнев, А.А. Смирнов // Физические основы приборостроения. - 2017. - Т.6, №4(26). - С. 58-63.

в других изданиях:

- А5. Хлебников И.Б. Создание и исследование спектрометра гамма-излучения с «безазотной» микрокриогенной системой охлаждения полупроводникового детектора / И.Б. Хлебников, А.А. Приладышев, А.А. Смирнов, М.В. Липин // Ядерные измерительно-информационные технологии. - 2010. - № 3. - С. 17-21.
- А6. Хрунов В.С. Исследование эффекта поляризации и методы борьбы с ней в полупроводниковых детекторах на основе кристалла CdTe / В.С. Хрунов, С.Б. Чебышов, А.А. Смирнов, В.В. Кадилин,

- В.Г. Федорков, С.И. Кузьменко, Е.М. Тюрин, И.В. Гавриков, В.О. Небольсин, А.А. Каплун // Ядерные информационно-измерительные технологии. - 2012. - № 4 (44). - С. 67-76.
- A7. Хрунов В.С. Блок детектирования на основе теллурида кадмия. Методы и технологии / В.С. Хрунов, Ю.А. Петухов, Ю.П. Харитонов, А.А. Смирнов, А.А. Ольнев, Е.М. Тюрин, И.В. Гавриков // Ядерные информационно-измерительные технологии. - 2012. - № 3 (43). - С. 111-115.
- A8. Баранов А.Н. Оперативный элементный анализ металло содержащих природных и техногенных материалов / А.Н. Баранов, А.П. Марков, А.А. Смирнов, В.М. Залетин, М.С. Хозяинов // Каротажник. - 2013. - №6(228). - С.53-63.
- A9. Баринов А.В. Автоматизированный комплекс контроля толщины технологических покрытий элементов ЖРД / А.В. Баринов, Д.С. Сергеев, И.Ю. Кинжагулов, А.А. Смирнов, К.А. Степанова, В.А. Калошин, А.М. Перфилов, А.С. Мачихин // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко. - 2015. - Т. 1, № 32 (1). - С. 275-288.
- A10. Миллер М.Б. Транспортные характеристики монокристаллов CdTe и CdZnTe для неохлаждаемых полупроводниковых детекторов ядерного излучения / М.Б. Миллер, В.Г. Федорков, В.С. Хрунов, И.М. Газизов, А.А. Смирнов, И.А. Каплунов // Труды XIII Международной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов». Курск: ЮЗГУ; НИТУ «МИСиС». - 2016. - Ч. 2. - С.133-139.
- A11. Смирнов А.А. Новые материалы для неохлаждаемых полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений / А.А. Смирнов, И.А. Каплунов, А.С. Мачихин, А.А. Ольнев // Физика и технология наноматериалов и структур: сборник научных статей 3-й Международной научно-практической конференции. Курск: ЗАО «Университетская книга». - 2017. - Т. 1. - С. 327-332.
- A12. Смирнов А.А. Измерение характеристик CZT детекторов при оптическом возбуждении носителей заряда с возможностью сканирования лазерным пучком / А.А. Смирнов, И.М. Газизов, А.А. Ольnev, В.Г. Федорков, И.А. Каплунов // Сборник научных трудов VI Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ. - 2017. - С. 518-519.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аркадьева Е.Н. О возможности использования теллурида кадмия для создания пр детекторов гамма-квантов / Е.Н. Аркадьева, О.А. Матвеев, Ю.В. Рудь, С.М. Рывкин // ЖТФ. – 1966. - Т. 36, №. 6. - С. 1146-1148.
2. Аркадьева Е.Н. О спектрометрии α частиц п-р счетчиками на основе теллурида кадмия / Е.Н. Аркадьева, Л.В. Маслова, О.А. Матвеев, Ю.В. Рудь // ФТП. - 1967. - т. 1, №. 5. - с. 805-806.
3. Mayer J.W. Semiconductor detectors for nuclear spectrometry II / J.W. Mayer // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1966. - vol.43. - p. 55.
4. Arkadeva E.N. On the CdTe detectors / E.N. Arkadeva, L.V. Maslova, O.A. Matveev, S.M. Ryvkin, and Y.V.Rud // IEEE Transactions on Nuclear Science. - 1968- vol. NS-15, no. 3-4. - pp. 258-259.
5. Akutagawa W. The possibilities of using CdTe as a gamma spectrometer / W. Akutagawa and K. R. Zanio // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1968. - vol. NS-15, no. 3-4. - pp. 266-274.
6. Cornet A. Cadmium telluride surface barrier detectors / A. Cornet, P. Siffert, A. Coche, and R. Triboulet // Applied Physics Letters. – 1970. - vol. 17. - pp. 432-436.
7. Arlt R. Overview of the use of CdTe detectors for the verification of nuclear material in nuclear safeguards / R. Arlt, K.H. Czock, and D.E. Rundquist // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1992. - vol. A322. - pp. 575-582.

Подписано в печать 20.12.2018. Формат 60 x 84 ¹/₁₆.

Усл. печ. л. 1,2. Тираж 100 экз. Заказ № 671.

Редакционно-издательское управление

Тверского государственного университета.

Адрес: 170100, г. Тверь, Студенческий пер. 12, корпус Б.

Тел. РИУ (4822) 35-60-63.