

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

государственного научного учреждения  
«Объединенный институт энергетических и  
ядерных исследований – Сосны»  
Национальной академии наук Беларуси  
канд. физ.-мат. наук

А.В. Кузьмин

05.02.2019 г.

### **Отзыв ведущей (оппонирующей) организации**

государственного научного учреждения «Объединенный институт  
энергетических и ядерных исследований – Сосны»

Национальной академии наук Беларуси

на диссертационную работу Смирнова Александра Александровича  
«Электрофизические характеристики детектирующих структур на основе CdTe  
и CdZnTe», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Представленная на отзыв диссертационная работа Смирнова Александра Александровича посвящена изучению электрофизических характеристик кристаллов CdTe и CdZnTe и детектирующих структур на их основе, а также установлению корреляции между этими характеристиками и спектрометрическими характеристиками полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений на основе CdTe и CdZnTe.

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Для регистрации рентгеновского и  $\gamma$ -излучений наиболее широко используются полупроводниковые детекторы (из сверхчистого германия (HPGe) и приборы на основе неорганических сцинтилляторов. HPGe-детекторы обеспечивают наилучшее энергетическое разрешение ( $\Delta E/E \sim 0.1\%$ ) и высокую эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов в диапазоне энергий 1–1000 кэВ. Однако для обеспечения работоспособности этих детекторов требуется их

охлаждение до температуры жидкого азота, что для ряда экспериментальных исследований не всегда приемлемо

Сцинтилляционные счетчики наиболее просты в эксплуатации, но их разрешение на порядок хуже, чем HPGe-детекторов. Поэтому длительное время ведутся исследования по использованию для  $\gamma$ -спектрометрии полупроводников с широкой запрещенной областью на основе следующих материалов: кадмий–теллур CdTe, кадмий–цинк–теллур CdZnTe (CZT), диодид ртути (HgI<sub>2</sub>), арсенид галлия (GaAs). К основным свойствам указанных материалов относятся: высокий эффективный атомный номер ( $Z \approx 32-70$ ), большая ширина запрещенной зоны ( $\Delta E_g \approx 1.4-2.3$  эВ), низкая энергия образования электрон-дырочной пары ( $\epsilon \sim 4.5$  эВ) и достаточно высокая подвижность носителей заряда. Это означает, что детекторы, изготовленные на их основе, способны работать при комнатной температуре. Они имеют лучшее энергетическое разрешение по сравнению со сцинтилляционными счетчиками, обладают более высокой эффективностью регистрации  $\gamma$ -излучения.

Из указанных материалов наибольшее внимание привлекает CdZnTe (или CZT). Детекторы на основе этого материала в настоящее время обладают наилучшими спектрометрическими характеристиками по сравнению с приборами на основе других широкозонных полупроводников.

Несмотря на ряд достоинств детекторов на основе CdTe и CdZnTe их использование сдерживается трудностями получения монокристаллов большого объема с необходимыми электрофизическими параметрами.

Таким образом, диссертационная работа А.А. Смирнова представляется перспективным исследованием, направленным на разработку комплексной методики исследования электрофизических параметров кристаллов CdTe и CdZnTe, позволяющей определить критические параметры материала, конструктивных элементов и особенностей технологии изготовления

детектирующих структур (на основе кристаллов CdTe и CdZnTe), влияющих на качество детекторов и приборов.

### **Краткое содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа А.А. Смирнова состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций автора и списка литературных источников.

Во введении обосновывается выбор темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, положения, выносимые на защиту.

В главе 1 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.

В главе 2 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 главе 3 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 флуктуации заряда. Осуществлено моделирование процесса сбора заряда и влияния электрофизических характеристик на формирование спектра в детектирующих структурах.

Осуществлено сравнение смоделированных спектров гамма-излучения с экспериментальными данными.

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 главе 4 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  $\mu\tau$  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 главе 5 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  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ . Облучение детекторов происходило со стороны катода детекторов.

Результаты исследований детекторов показывают, что их характеристики детекторов не уступают приведенным аналогичным характеристикам зарубежных изготовителей.

В заключении представлены основные результаты и выводы.

### **Научная новизна диссертационной работы**

В диссертационной работе А.А. Смирнова установлено, что транспортные свойства электронов на детектирующих структурах CdZnTe выше, чем на CdTe; хорошие параметры транспортного переноса  $\mu\tau_e$  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).

Работа содержит следующие новые результаты:

- 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 квази-полусферических 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.

### **Значимость полученных результатов**

Впервые в Российской Федерации 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 °С.

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 успешно использованы при выполнении ОКР И НИОКР по созданию приборов на основе CdZnTe, CdTe для следующих предприятий: АО «ФЦНИВТ», «СНПО «Элерон» НИЯУ МИФИ, ГК «Росатом», АО «СНИИП».

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Полученные в диссертационной работе результаты представляют большой интерес для специалистов по особо чистым материалам, выращиванию структурно совершенных монокристаллов, механической прецизионной обработке, полупроводниковой электронике, дозиметрии и спектрометрии ионизирующих излучений, ядерной физике.

### **Недостатки диссертационной работы и замечания**

К диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Представленная математическая модель формирования амплитудного спектра в детекторах на основе CdTe, CdZnTe при облучении гамма-квантами не учитывает влияния шероховатости поверхности кристаллов на спектрометрические характеристики детектора, что несколько сужает область применения этой модели. Широкое применение теллурида кадмия сдерживается не только технологическими сложностями выращивания качественных монокристаллов, так и проблемами, связанными с механохимической обработкой поверхности.

2. Помимо азота в спектрометрах на основе ОЧГ используют электронное охлаждение. Автору также следует показать преимущества детекторов на основе CdTe и CdZnTe перед ОЧГ с электронным охлаждением.

3. Автору следует обратить внимание на такие перспективные сцинтилляционные кристаллы как LaBr и SrI, обладающие не только высокой эффективностью регистрации в энергетическом диапазоне от 20 кэВ до 10 МэВ, но и энергетическим разрешением, сравнимым с детекторами на основе CdTe и CdZnTe.

Перспективные сцинтилляционные кристаллы как LaBr и SrI, дорогие, но они не требуют охлаждения. Можно вырастить кристаллы LaBr и SrI больших размеров, что в свою очередь затруднительно для кристаллов CdTe и CdZnTe (эффективность регистрации). Их энергетическое разрешение по гамма линии 662 кэВ Cs-137 составляет порядка 2–3 % (по сравнению с 0,1 % у кристаллов ОЧГ).

4. Автору следует указать область применения детекторов на основе CdTe, CdZnTe. Например, они не заменимы при измерениях в сильных нейтронных полях (радиационная стойкость). Их размеры сравнимы с размерами миниатюрных камер деления.

5. В тексте диссертации имеются опечатки и встречаются стилистические неточности.

### **Заключение**

Диссертационная работа А.А. Смирнова представляет собой целостное, завершённое исследование, содержащее новые оригинальные научные результаты. Впервые в РФ проведено комплексное исследование и выявлены особенности электрофизических параметров и свойств монокристаллов CdTe, CdZnTe. Работа выполнена на актуальную тему и имеет практическое значение для разработки приборов на основе широкозонного полупроводникового соединения CdTe, CdZnTe. Полученные в работе результаты и сделанные на их основе выводы являются обоснованными. Апробация работы является достаточной, основные результаты работы опубликованы в рецензируемых отечественных журналах. Содержание автореферата диссертации соответствует основным положениям диссертации.

Таким образом, диссертационная работа «Электрофизические характеристики детектирующих структур на основе CdTe и CdZnTe» удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. а ее автор, Смирнов Александр Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния за

- разработку математической модели 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.

- разработку методологии контроля электрофизических характеристик монокристаллов CdTe и CdZnTe, используемых для изготовления детекторов ионизирующих излучений.

- разработку методов изготовления планарных и квази-полусферических 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.

Эксперты:

Заведующий лабораторией  
физики ядерных реакторов научного  
учреждения «ОИЭЯИ – Сосны»,  
доктор физико-математических наук,  
01.04.16 – физика атомного ядра и  
элементарных частиц  
220109, г. Минск, а/я 119,  
тел.: 8 (017) 391 13 44

Э.А. Рудак

Заведующий лабораторией  
экспериментальных ядерно-физических  
исследований и экспертных анализов  
радиоактивных материалов научного  
учреждения «ОИЭЯИ – Сосны»,  
кандидат технических наук,  
05.14.03 – ядерные энергетические  
установки, включая проектирование,  
эксплуатацию и вывод из эксплуатации;  
220109, г. Минск, а/я 119,  
тел.: 8 (017) 391 18 22,  
e-mail: zhuk@sosny.bas-net.by

И.В. Жук

Отзыв заслушан и обсужден на заседании ученого совета научного учреждения «ОИЭЯИ – Сосны» после научного доклада соискателя и дискуссии по докладу. Всего членов ученого совета – 25, присутствовало – 20, из них имеющих научные степени – 19, из них голосовало за утверждение отзыва: за – 19, против – нет, воздержались – нет.

Протокол заседания ученого совета от 05.02.2019 № 2.

Зам. председателя ученого совета

Т.Н. Корбут

Секретарь ученого совета

А.В. Радкевич