

## ОТЗЫВ

официального оппонента Поликарповой Наталии Вячеславовны

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

Работа Смирнова А.А. посвящена исследованию электрофизических свойств широкозонных материалов CdTe и CdZnTe и детектирующих структур на их основе. **Актуальность** тематики диссертации связана с широким спектром областей практического применения детекторов на базе исследуемых материалов. Перечень областей применения включает медицину, астрофизику, металлургию и ядерные технологии. Детекторы на базе кристаллов CdTe и CdZnTe являются компактными и, в большинстве случаев, не требуют охлаждения до температуры жидкого азота.

Необходимость построения эффективно функционирующих детекторов формирует потребность в детальном изучении электрофизических характеристик CdTe, CdZnTe. Востребованы исследования связи этих характеристик для исходного материала, выращенного с применением различных технологий и технологических режимов, со спектрометрическими свойствами детектирующих структур.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка литературы. Диссертация изложена на 168 страницах, включает 90 рисунков и 30 таблиц, список использованной литературы из 88 источников.

Во **введении** диссертантом дан исторический обзор мирового приборостроения на основе CdTe и CdZnTe, проанализированы технологии изготовления детекторов, технологии выращивания CdTe и CdZnTe, обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель и задачи работы. Показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, методология и методы исследования. Представлены научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертант анализирует современные требования к качеству кристаллов, области применения, технологии выращивания и изготовления детекторов из CdTe и CdZnTe, необходимость улучшения их характеристик в зависимости от направлений использования. Описывает подход к экспериментальному исследованию и теоретической интерпретации электрофизических свойств.

**Во второй главе** представлены теоретические основы используемых в работе методов исследования электрофизических характеристик монокристаллов CdTe и CdZnTe, рассмотрены методы определения подвижности и параметров уровней захвата носителей заряда с помощью времяпролётной техники, ТРСГУ, фотопроводимости. Описаны применённые приборы и оборудование для экспериментальных исследований, основанных на приведенных методах изучения электрофизических характеристик.

**В третьей главе** диссертации построена математическая модель процесса сбора заряда и формирования амплитудного спектра в детекторах ионизирующих излучений при облучении гамма-квантами. Осуществлено моделирование процесса сбора заряда и влияния электрофизических характеристик на формирование спектра в детектирующих структурах с различной геометрией контактов. Приведено сравнение смоделированных спектров гамма-излучения с экспериментальными данными.

**В четвертой главе** диссертантом представлены методики и технологические приёмы изготовления детектирующих структур мягкого

рентгеновского и жёсткого гамма-излучений из монокристаллов отечественного и зарубежного производства, выполнены исследования для определения ряда электрофизических характеристик кристаллов.

**В пятой главе** приведены результаты экспериментального исследования характеристик спектрометра энергий ионизирующих излучений на основе детектирующей структуры с компланарной геометрией контактов на основе CdZnTe. Измерены ВАХ, спектры от источников гамма-излучения, обоснован выбор напряжений смещения детектора, приведены зависимости энергетического разрешения от времени формирования сигнала в спектрометрическом тракте. Измерены спектры от источников гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ . Энергетическое разрешение детектора по линиям с энергиями 31 кэВ, 81 кэВ и 662 кэВ составило 8,0; 7,0 и 11,5 кэВ, соответственно.

В заключении диссертантом представлены **основные результаты и выводы**.

Научная **новизна** диссертации опирается на следующие основные результаты:

- Разработана методология контроля электрофизических характеристик монокристаллов CdTe и CdZnTe.
- Разработана математическая модель сбора заряда и формирования амплитудного спектра в детекторах на основе CdTe и CdZnTe, опирающаяся на проверенный во многих приложениях код Geant4.
- Разработаны методы изготовления планарных и квазиполусферических детекторов для промышленного применения.
- Установлено, что хорошие параметры транспортного переноса  $\mu\tau_e$  электронов на детекторных структурах CdZnTe определяются малой концентрацией глубоких и мелких центров захвата носителей.
- Показано, что характеристики детекторов не уступают приведенным аналогичным характеристикам зарубежных изготовителей.

**Практическую значимость** имеет предложенные диссертантом методики и технология изготовления детектирующих структур, позволяющие, применяя изложенную в диссертации комплексную методику отбора кристаллов, изготавливать детекторы с высоким энергетическим разрешением. Подтверждением практической значимости являются ОКР и НИОКР по разработке детекторов, в которых использованы результаты диссертации.

Работа не лишена **недостатков**:

- Приведенное на Рис. 3.7 сравнение результата Монте-Карло моделирования с экспериментом указывает на то, что в эксперименте наблюдается сильный, не предсказанный в моделировании, пик на энергии порядка 10 кэВ. В диссертации нет обсуждения возможных причин данного значимого отличия.

- В третьей главе присутствует некоторая непоследовательность изложения. В разделе 3.4.4 повторяются виды взаимодействия, уже обсуждавшиеся в разделах 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3.

- Имеются недостатки оформления. Так, на Рис. 1 а,б в реферате и Рис 3.7,3.8 в диссертации результаты измерения отражены различными оттенками синего цвета, а результаты моделирования имеют различные заголовки («модель» и «расчет»). Кривая для данных на Рис. 3.7 отличается от кривой на соответствующем Рис. 1-а в автореферате. На Рис. 3.5,3.6 удобнее было бы использовать единицы мкс и нА.

- В тексте присутствуют опечатки. Так, на стр. 13 в словах «метод зонной плавки» пропущена одна «н». Для термина «времяпролётная техника» используются варианты написания через дефис и через пробел.

Указанные замечания не снижают положительную оценку диссертационной работы **Смирнова Александра Александровича**, которая является законченной научной квалификационной работой, содержащей новые ценные в научном и прикладном отношении результаты. Основные результаты диссертационной работы своевременно опубликованы и

представлены на российских и международных научных конференциях. Автореферат достаточно полно отражает 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

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

Поликарпова Наталия Вячеславовна

Дата: 16.01.2019 г.

Адрес: 119991, г. Москва Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Тел: +7(495)939-4404

E-mail: polikarp@phys.msu.ru

Декан Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,  
профессор, Сысоев Н.Н.