

## Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Павлюк Марины Дмитриевны

«Детекторные кристаллы на основе CdTe и  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  для прямого счета рентгеновских и гамма-квантов», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Диссертация Павлюк Марины Дмитриевны посвящена исследованию и получению монокристаллических материалов CdTe и CdZnTe (диаметр более 100 мм) с высоким структурным совершенством, и созданию на их основе рабочих элементов для использования в детекторах.

В настоящее время кристаллы CdTe и CdZnTe являются одним из ключевых материалов для разработки рентгеновских и гамма-детекторов работающих при комнатной температуре. На сегодняшний день в Российской Федерации проблема материалов для таких детекторов не решена. Актуальность диссертационной работы Павлюк М.Д. не вызывает никакого сомнения.

Результаты диссертационной работы представляют интерес для реализации государственной программы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» и Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 - 2027 годы.

В диссертационной работе Павлюк М.Д. представлен большой объем экспериментальных исследований. Предложена и применена оригинальная методика получения чистых компонентов Cd, Zn и Te; проведено математическое моделирование процесса выращивания кристаллов CdTe модифицированным методом Обреимова-Шубникова, для достижения оптимальных характеристик кристаллов. В сочетании выше сказанного автору удалось получить высококачественные беспреципитатные монокристаллы, структурное совершенство которых подтверждено с применением современных экспериментальных приборов.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 153 страницы, включая 52 рисунка, 23 таблицы и список литературы из 147 наименований.

**Во введении** диссертации обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, определены научная новизна, практическая значимость результатов исследования, перечислены методы исследования, изложены выносимые на защиту научные положения, аргументирована достоверность полученных результатов. Здесь же дана информация об апробации и личном вкладе автора диссертации, публикациях по теме работы, кратко описаны структура и содержание диссертации.

**В первой главе** диссертационной работы приводится широкий обзор литературы и посвящена анализу имеющихся данных и результатов, полученных в предметной области к моменту начала исследований по тематике диссертации. Обзор достаточно полно отражает состояние научных направлений, к которым относится данная диссертационная работа.

**Во второй главе** подробно рассматриваются условия глубокой очистки компонентов Cd, Te и Zn методом вакуумной дистилляции и влияние условий на качество очищаемого материала.

**В третьей главе** представлены результаты численного моделирования процесса выращивания монокристаллов CdTe (диаметром более 100 мм) методом Обреимова-Шубникова. Задача решалась с использованием программного обеспечения ANSYS 14.5 Fluent, основанного на использовании приближенных методов математического моделирования. Стоит отметить, что для надежности полученных результатов автором были проведены дополнительные исследования. Результаты расчета были подтверждены данными энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией и рентгеновской топографией с использованием синхротронного излучения.

**В четвертой главе** представлены результаты исследований структурных характеристик монокристаллов  $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$  в зависимости от условий роста. Продемонстрировано, что с концентрацией Zn  $x = 10\%$  получены крупные беспреципитатные монокристаллы с отсутствием малоугловых границ, микродвойников и микрофазных включений, с плотностью дислокаций  $1,25 \times 10^4 \div 3 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ .

**В пятой главе** представлены результаты исследований: условий химической обработки поверхности монокристаллов CdTe и CdZnTe, для получения параметра шероховатости менее 1 нм и влияния качества обработки кристаллов на электрические и спектральные характеристики чувствительных элементов. На базе полученных кристаллов был изготовлен многоэлементный рентгеновский детектор, обладающий достойными характеристиками. Это открывает широкие перспективы применения разработанного устройства в различных областях науки и техники.

В заключительной части диссертационной работы автор резюмирует основные результаты работы, которые в полной мере соответствуют заявленным цели и задачами работы. В качестве основных результатов работы, представленных в диссертации, следует выделить следующие:

1. Проведено математическое моделирование процесса выращивания кристаллов CdTe диаметром 100 мм модифицированным методом Обреимова-Шубникова для оптимизации условий роста. Рассчитано, что межфазная граница на стадии разрастания кристалла слегка выпуклая, а при температуре 1090 °С форма фронта кристаллизации становится плоской. Определены оптимальные условия роста (градиенты температур: осевой — 2–3 К/см и радиальный — 0.2–0.4 К/см.) с плоским фронтом кристаллизации, способствующие уменьшению дефектов структуры. Установлено, что снижение осевого градиента температуры при уменьшении подогрева дна тигля устраняет появление пор и парофазных кристаллов на поверхности слитка.

2. Синтезированы соединения CdTe, Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te и проведен анализ микропримесного состава полученных кристаллов. За счет разработанной методики очистки исходных веществ, после синтеза и роста удается сохранить высокую степень чистоты соединений CdTe и Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te.

3. Предложены оптимальные условия роста (четырёхступенчатое охлаждение, при осевом градиенте температуры 2-3 К/см и радиальном градиенте 0,2-0,4 К/см) монокристаллов CdTe и Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te, при оптимальной концентрации Zn  $x = 10 \%$ , без малоугловых границ, микродвойников и микрофазных включений, с плотностью дислокаций  $1,25 \times 10^4 \div 3 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ . Получены совершенные монокристаллы диаметром до 120 мм, с высоким удельным электрическим сопротивлением ( $8,8 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ).

В качестве научной новизны можно выделить несколько основных пунктов:

1. На основе проведенных исследований впервые в РФ разработана и реализована методика получения особо чистых материалов Cd (из марки КД-0) – 99,99999% и Te (из марки Т-А1) – 99,99999%, не уступающих по степени чистоты материалам, получаемым мировым лидером (Acrograd Co., Ltd (Япония)). Для Zn достигнута степень очистки (из марки ЧДА) – 99,999999%, что на порядок превосходит чистоту Zn, реализуемого мировым лидером. Потери очищаемого материала разработанным методом составляют менее 1%.
2. Впервые разработана методика получения беспреципитатных монокристаллов CdTe и CdZnTe, диаметром более 100 мм детекторного качества;
3. Усовершенствована методика обработки поверхности кристаллов CdTe и CdZnTe, обеспечивающая шероховатость поверхности на уровне 0,8 нм, что на сегодняшний

день является максимальным показателем, и соответствует шероховатости, обнаруживаемой на сколах данных кристаллов по плоскостям, являющимися плоскостями спайности.

4. Впервые в РФ на основе выращенных монокристаллов CdTe и CdZnTe был изготовлен многоэлементный рентгеновский детектор и получено цифровое рентгеновское изображение.

Практическая значимость работы не вызывает сомнения. Результаты работы Павлюк М.Д. прекрасно сочетают фундаментальные исследования, включающие моделирование процесса роста монокристаллов и практическое применение в виде изготовленного многоэлементного рентгеновского детектора, с которого удалось получить цифровое рентгеновское изображение при комнатной температуре.

Достоверность представленных в работе результатов подтверждается использованием современных методов экспериментов и современного программного обеспечения. Также достоверность результатов подтверждается наличием патентов и публикаций в рецензируемых научных изданиях и выступлениями на различных национальных и международных конференциях.

Личный вклад Павлюк М.Д. и ее высокая квалификация не вызывает сомнений. Прделан большой объем экспериментальной работы, включающий в себя: подбор условий экспериментов, получение образцов, подготовку исследуемых образцов, проведение экспериментов и анализ полученных результатов. Вся работа проделана лично автором или при ее непосредственном участии.

К диссертации Павлюк М.Д. имеется ряд замечаний:

1. Мало представлены данные по системам Zn-Te и Cd-Te в области существования соединений ZnTe, CdTe и их твердых растворов. В работе отсутствует связь между режимами получения стехиометрических составов кристаллов с данными Р-Т-Х систем, не рассмотрена роль парциальных давлений компонентов на состав и свойства получаемых кристаллов.

2. Монокристаллы ZnTe, CdTe и их твердые растворы из раплава получают методами зонной плавки, Бриджмена и по Чохральскому в работе эти методы не рассмотрены и преимущество выбранного метода мало обосновано.

3. Параметры приборов изготовленных и полученных в работе мронокристаллов не достаточно полно сопоставлены с известными аналогами.

4. В работе имеют место неточные формулировки, стилистические неточности, неудачное построение фраз, опечатки.

Сделанные замечания не снижают ценность выполненных диссертантом работ и не могут повлиять на общую, высокую положительную оценку, а носят в основном рекомендательный характер. Автореферат диссертации кратко, и в то же время, достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа М. Д. Павлюк представляет собой завершённую научно-квалификационную работу и полностью соответствует всем критериям и требованиям раздела II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, а её автор, Павлюк Марина Дмитриевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния».

Отзыв составил 17-06-2020:

Официальный оппонент:

Маренкин Сергей Федорович

Профессор, доктор химических наук, главный научный сотрудник лаборатории полупроводниковых и диэлектрических материалов, ФГБУН Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук (ИОНХ РАН)

119991, Москва, Ленинский проспект, 31

Телефон: +7 (495) 952-07-87

Электронная почта: [marenkin@rambler.ru](mailto:marenkin@rambler.ru)

Подпись официального оппонента С.Ф.Маренкина заверяю

