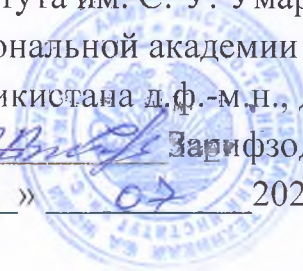


УТВЕРЖДАЮ

Директор Физико-технического
института им. С. У. Умарова
Национальной академии наук
Таджикистана д.ф.-м.н., доцент


Зарифзода А.К.
« 28 » 07 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Носирзода Мухаммад на тему «Влияние малых потоков тепловых нейтронов на электрофизические, структурные и оптические свойства полупроводниковых соединений CdTe и CdZnTe» на соискание учёной степени доктора философии (PhD) – доктор по специальности 6D060400-Физика (6D060407-Физика конденсированного состояния).

Актуальность выбранной темы. Полупроводниковые соединения CdTe и CdZnTe являются одними из наиболее перспективных материалов для создания высокоэффективных детекторов ионизирующего излучения, фотоприёмников, солнечных элементов, а также других оптоэлектронных и ядерных приборов. Их уникальные свойства, такие как широкий запрещённый промежуток, высокая эффективная масса носителей, высокая поглощательная способность и возможность работы при комнатной температуре, делают их незаменимыми в ряде критически важных приложений — от медицинской диагностики до систем безопасности и космических технологий.

Современное развитие технологий требует повышения радиационной стойкости и стабильности параметров полупроводников при воздействии внешних факторов, в том числе нейтронного излучения. Особенно актуальным становится исследование воздействия малых потоков тепловых нейтронов, характерных для условий длительного хранения или эксплуатации приборов в условиях естественного радиационного фона, на структурные, электрофизические и оптические свойства кристаллов CdTe и CdZnTe.

На сегодняшний день большинство исследований сосредоточено на влиянии интенсивного нейтронного облучения, в то время как воздействие малых потоков тепловых нейтронов остаётся менее изученным, несмотря на его практическую значимость. В частности, малые дозы облучения могут приводить не к деградации, а к структурному совершенствованию кристаллов,

за счёт рекомбинации дефектов и уменьшения напряжённостей в решётке. Эти эффекты могут быть использованы для радиационной обработки материалов с целью улучшения их характеристик.

Соответствие паспорту научной специальности.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 6D060400 – Физика (6D060407-Физика конденсированного состояния), который утвержден Высшей аттестационной комиссией при Президенте Республики Таджикистан по следующим пунктам:

- теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков, в том числе светящихся веществ, как в твердом, так и в аморфном состояниях в зависимости от химического состава, изотопа, температуры и давления.
- разработка математических моделей и прогнозирование изменения физических свойств конденсированных сред в зависимости от влияния внешних факторов.
- разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и изложение физических основ промышленной технологии получения веществ с определенными свойствами.

Степень обоснованности научных положений, выводов и предложений. Научные положения, выводы и предложения, представленные в диссертации, обоснованы на основе комплексного анализа экспериментальных данных, полученных с использованием современных и надёжных методов исследования. Работа опирается на результаты рентгеноструктурного анализа, оптической спектрофотометрии, электрических измерений, кванто-механических расчетов, что обеспечивает всестороннее рассмотрение влияния малых потоков тепловых нейтронов на свойства полупроводников CdTe и CdZnTe.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что впервые:

- экспериментальными методами установлено уменьшение удельного сопротивления CdTe и CdZnTe после облучения малыми потоками тепловых нейтронов;
- выявлено улучшение структуры кристаллов CdTe после облучения малыми потоками тепловых нейтронов, о чем свидетельствует увеличение интенсивности рентгеновских рефлексов;

- установлено зависимость структурных параметров CdTe и CdZnTe от потока тепловых нейтронов;
- проведен кванто-механический расчет структурных и оптических свойств CdZnTe в зависимости от концентрации Zn;
- проведен кванто-механическое моделирования процесса взаимодействия тепловых нейтронов на CdTe.

Теоретическая ценность работы. Автору удалось продемонстрировать, что воздействие тепловых нейтронов может быть использовано не только как разрушительный, но и как модифицирующий фактор, способствующий улучшению характеристик полупроводникового материала. Рассматривается физическая природа наблюдаемых процессов, которая может быть обусловлена ядерными реакциями и последующим формированием новых изотопов, способствующих упорядочению кристаллической решётки и снижению плотности дефектов. Это положение представляет собой значимый вклад в развитие научных представлений о радиационно-индуцированной модификации твердотельных структур.

Практическая значимость работы не вызывает сомнений. Результаты исследования могут быть использованы в прикладных разработках в области фотоэнергетики (в частности, при создании и оптимизации солнечных элементов на основе CdTe) и ядерной электроники (детекторы ионизирующего излучения на основе CdZnTe). Представленные данные позволяют говорить о возможностях целенаправленного улучшения свойств кристаллов с помощью нейтронного воздействия, что открывает перспективы для внедрения данной технологии в серийное производство материалов специального назначения.

Достоверность полученных результатов обеспечивалась применением современных и надёжных методов исследования, также наличием многократно повторяемых экспериментальных данных, соответствие экспериментальных результатов с кванто-механическими расчетами и результатами литературных данных.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии на всех этапах выполнения диссертационного исследования. Автором разработан план проведения экспериментов, организовано облучение образцов CdTe и CdZnTe тепловыми нейтронами, а также проведены измерения их электрофизических характеристик. Также автором выполнены экспериментальные исследования структурных изменений образцов методом рентгеноструктурного анализа, а также изучение оптических свойств. Все этапы обработки экспериментальных данных, включая математический и статистический анализ результатов, а также их компьютерную визуализацию, были реализованы автором самостоятельно.

Опубликованные результаты диссертации. Основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, отражены в 17 научных публикациях, что свидетельствует о широкой апробации проведённого исследования в научном сообществе. Из них: 1 статья опубликована в зарубежном научном журнале, входящем в международную реферативную базу данных Scopus, 4 статьи размещены в рецензируемых научных изданиях, включённых в перечень ВАК Республики Таджикистан, 12 тезисов докладов опубликованы в материалах и сборниках трудов конференций различного уровня — республиканского и международного. Публикации охватывают все ключевые этапы исследования, включая обоснование актуальности темы, описание методологии, представление и обсуждение экспериментальных и теоретических результатов, а также выводы, выносимые на защиту.

Оценка содержания диссертации и степени её завершённости.

Содержание диссертационной работы соответствует заявленной теме и охватывает все основные аспекты, необходимые для всестороннего изучения влияния малых потоков тепловых нейтронов на электрофизические, структурные и оптические свойства полупроводниковых соединений CdTe и CdZnTe. Работа построена логично, включает обоснование актуальности, постановку цели и задач, описание методик исследования, анализ полученных результатов и формулировку выводов.

Полученные результаты систематизированы, подкреплены графическим и табличным материалом, а также сопоставлены с существующими данными из научной литературы. Все разделы логически взаимосвязаны и направлены на достижение поставленной цели.

В целом, работа имеет внутреннее единство, представляет собой завершённое научное исследование, результаты которого могут быть использованы как в фундаментальной науке, так и в прикладных задачах, связанных с разработкой и радиационной стойкостью полупроводниковых материалов.

Структура и объем диссертации. Представленная на отзыв диссертационная работа Носирзода Мухаммад состоит из введения, четырех глав, общего заключения, списка цитированной литературы. Она изложена в 142 страницах, включая 55 рисунков, 12 таблиц и библиографических ссылок из 149 наименований.

Во введении обоснована актуальность выбранной научной проблемы, раскрыто значение изучения влияния малых потоков тепловых нейтронов на свойства полупроводниковых соединений CdTe и CdZnTe. Сформулированы цель и основные задачи исследования, определены его объект и предмет,

обозначены научная новизна и практическая значимость работы. Также приведены положения, выносимые на защиту, раскрыта достоверность полученных результатов и указан личный вклад автора в выполнение научной работы.

Первая глава посвящена обзору современных научных представлений о взаимодействии ионизирующего излучения с полупроводниковыми материалами. Подробно рассмотрены механизмы радиационного воздействия на структуру и свойства кристаллов, с акцентом на влияние нейтронного облучения. Особое внимание уделено теоретическим и экспериментальным работам, связанным с изменением электрофизических и оптических характеристик CdTe и CdZnTe под действием различных доз облучения. Сформулированы научные предпосылки и мотивация для проведения собственного исследования.

Во второй главе изложены методологические основы исследования. Описаны технологии получения и предварительной подготовки образцов CdTe и CdZnTe, методика расчёта потоков тепловых нейтронов, а также процедура их облучения с использованием источника нейтронов Pu-Be. Подробно представлены применяемые экспериментальные методы: рентгеноструктурный анализ с использованием дифрактометра ДРОН-3.0, спектрофотометрия в ультрафиолетовой и видимой областях (UV-Vis), а также квантово-механические расчёты, направленные на определение электронной структуры и ширины запрещённой зоны.

Третья глава содержит результаты экспериментальных исследований влияния малых потоков тепловых нейтронов на электрофизические и структурные свойства образцов CdTe и CdZnTe. Представлены сравнительные рентгенодифракционные данные до и после облучения, выявлены закономерности изменения интенсивности и ширины дифракционных пиков в зависимости от величины нейтронного потока. Показано, что при определённых потоках облучения возможно улучшение кристаллического порядка.

Четвёртая глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию электронных и оптических характеристик полупроводниковых соединений CdTe и CdZnTe. В рамках этой части работы выполнены квантово-механические расчёты с использованием теории функционала плотности (DFT), реализованной в программном комплексе WIEN2k. Рассмотрены энергетическая зонная структура, плотность состояний, распределение электронных уровней и рассчитаны основные оптические параметры, включая

коэффициент поглощения, показатель преломления и ширина запрещённой зоны.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, основанные на полученных данных и их анализе.

Тем не менее, при всестороннем рассмотрении работы, были высказаны следующие **замечания**:

1. В параграфе 2.1 главы 2 представлена методика получения и обработки исследованных образцов со ссылкой на литературу [109], в которой автор диссертации не указан как соавтор. Было бы полезно прояснить, какая часть данной методики реализована самим диссертантом.
2. Соискатель утверждает, что при облучении теллурида кадмия тепловыми нейтронами ($E \sim 0.025$ эВ) реализуются ядерные превращения по формулам 3.1 и 3.2, сопровождающиеся испусканием протона или α -частицы. Однако для таких реакций необходима энергия порядка нескольких МэВ, что в миллионы раз превышает энергию теплового нейтрона. Ключевой вопрос заключается в том, достаточна ли энергия тепловых нейтронов для протекания подобных ядерных реакций.
3. В параграфе 2.5 указано, что кристаллы CdTe перед исследованием оптических свойств измельчались до порошка. Такой подход вызывает сомнение, поскольку для плёночных образцов измельчение приводит к потере оптической однородности, искажению спектра, нарушению кристаллической структуры и появлению дефектов. Это существенно влияет на результаты. Корректнее было бы исследовать оптические свойства непосредственно плёночного CdTe.
4. В параграфе 3.3 соискатель объясняет появление дополнительных рефлексов на рентгенодифрактограммах теллурида кадмия после облучения тепловыми нейтронами (в области $2\theta \approx 43,5^\circ$) как результат образования примесных изотопов серебра и палладия, которые, по его мнению, способствуют увеличению электропроводности кристаллов. Появление нового рефлекса возможно, если указанные атомы формируют кристаллические фазы, а их концентрация превышает порог чувствительности метода. Для подтверждения данной гипотезы целесообразно провести анализ фазового состава и элементный анализ с целью достоверного установления присутствия серебра и палладия. При этом необходимо исключить иные возможные причины появления новых пиков, такие как окисление, образование вторичных фаз, а также структурные фазовые превращения, например переход теллурида кадмия из кубической в гексагональную модификацию.

5. В параграфе 4.2 проводится квантово-химическое моделирование «облучённой» кристаллической структуры, в рамках которого в выбранной суперячейке (108 атомов Cd и 108 атомов Te) удаляется один атом кадмия, тем самым имитируется вакансия, предположительно возникающая при облучении тепловыми нейтронами. Однако при этом не рассматривается внедрение атома серебра, которое в диссертации заявлено как основной фактор улучшения электрофизических свойств материала. Кроме того, указывается, что дифракционные рефлексы сужаются и смещаются в область меньших углов. Следует отметить, что в соответствии с законом Брэгга уменьшение межплоскостного расстояния должно приводить к смещению пиков в область больших углов, что ставит под сомнение корректность интерпретации.
6. В диссертации результаты облучения материалов тепловыми нейтронами интерпретируются как улучшение электрических характеристик теллурида кадмия. Однако полученные данные не сопоставлены с результатами отчёта НАСА (Charles E. Barnes, Chihiro Kikuchi Thermal-Neutron-Induced-Defects in Cadmium Telluride and Cadmium Sulfate, Technical Report NASA, 1967), где представлены комплексные исследования электрофизических и оптических свойств CdTe и CdS. В данной работе показано, что воздействие тепловых нейтронов приводит, напротив, к ухудшению проводимости как p-, так и n-типа. Кроме того в отчёте особо подчёркивается: “радиационный захват нейтронов кадмием не приводит к трансмутационному легированию, поскольку кадмий является стабильным ядром”. Отсутствие сравнения с этим фундаментальным источником снижает убедительность интерпретаций результатов.
7. В диссертации некоторые рисунки представлены в недостаточном качестве, что затрудняет их визуальное восприятие. В частности, подпись к рисунку 4.10 не соответствует содержанию графиков, что требует уточнения и корректировки.
8. В тексте диссертации имеются грамматические и стилистические ошибки, а также отдельные смысловые неточности. В частности, на стр. 27 используется некорректное выражение «понижению исходных свойств», на стр. 34 в первом абзаце встречается предложение, не связанное с остальным текстом, а также наблюдается смысловой повтор.

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку работы и не умаляют значимости основных результатов диссертации.

Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК при Президенте Республики Таджикистан. Оценивая работу в целом,

необходимо отметить, что диссертационная работа Носирзода Мухаммад содержит научно обоснованные разработки в области физики полупроводников. Основные выводы диссертации базируются на большом экспериментальном материале, их достоверность подтверждается согласованностью результатов, полученных с использованием различных методов исследования. Диссертация и автореферат написаны грамотно и хорошо оформлены. Отмеченные выше недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертации и не являются существенными. Автореферат и публикации достаточно полно и объективно отражают содержание диссертации.

Автореферат диссертации подготовлен в соответствии с установленным порядком получения ученой степени доктора философии (PhD) – доктор по специальности 6D060400 – Физика (или 6D060407 – Физика конденсированного состояния), полностью отражает основные содержания исследования, в нем обоснованы и полностью объяснены значимые научные результаты.

Диссертация соответствует требованиям пунктов 67 и 69 Порядка присуждения ученых степеней и ученых званий, утверждённого Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 июня 2021 года №267.

Соответствие научной квалификации докторанта для получения учёной степени. Проведённое диссертационное исследование Носирзода Мухаммад свидетельствует о высокой научной квалификации докторанта, достаточной для присуждения степени доктора философии (PhD) – доктор по специальности 6D060400 – Физика (или 6D060407 – Физика конденсированного состояния).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, диссертационная работа Носирзода Мухаммада на тему «Влияние малых потоков тепловых нейтронов на электрофизические, структурные и оптические свойства полупроводниковых соединений CdTe и CdZnTe», представленная на соискание учёной степени доктора философии (PhD) по специальности 6D060400 – Физика (6D060407 – Физика конденсированного состояния), выполнена на высоком научно-методическом уровне. Работа содержит элементы научной новизны, теоретическую обоснованность, практическую значимость и демонстрирует способность автора к самостоятельному проведению научных исследований. Содержание и результаты диссертационного исследования соответствуют требованиям пунктов 31, 33, 34 и 35 Порядка присуждения учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 июня 2021 года, №267.

Учитывая вышеизложенное, участники семинара считают, что Носирзода Мухаммад заслуживает присуждения учёной степени доктора философии (PhD) по заявленной специальности.

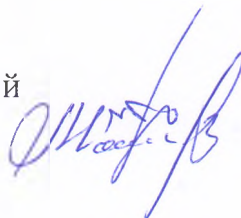
Отзыв подготовлен в соответствии с пунктами 76-79 и 81 Порядка присуждения ученых степеней и ученых званий, утверждённого Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 июня 2021 года №267.

Отзыв обсужден и утвержден на расширенном научном семинаре Физико-технического института им. С. У. Умарова НАНТ от 28 июля 2025 г. (протокол № 16), где диссертантом были изложены основные положения работы.

На заседании присутствовали: 21 человек.

Результаты голосования: за – 21 человек, против – нет, воздержавшиеся – нет.

Председатель расширенного семинара
Заместитель директора по научно-учебной
работе, к.ф.-м.н.



Р.С. Махмадбегов

Эксперты:

Заведующий лабораторией физики
кристаллов, к.х.н.



А. Холов

Ведущий научный сотрудник
лаборатории физики низких температур
и сверхпроводимости, к.ф.-м.н.



Ф. Холмуродов

Секретарь расширенного семинара
Заведующий отдела наноматериалов
и нанотехнологии, доктор PhD



М.М. Каюмов

Подписи Р.С. Махмадбегова, А. Холова, Ф. Холмуродова и М.М. Каюмова
заверяю:

Начальник ОК ФТИ НАНТ

Адрес: индекс, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект (улица).

Тел: (+99237) 2258084, 2258090, 2258092

E-mail: admin@phti.tj Официальный сайт: phti.tj

« 28 » 07 2025 г.