МОЛДАВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра прикладной физики и информатики

На правах рукописи

У.Д.К. 537.311.322:539.21 (043.3)

АЛЬ-КАССЕМ АМДЖАД

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ СЛОЕВ CdTe

Специальность

134.01- ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени доктора физических наук

КИШИНЕВ, 2025

Диссертация выполнена в департаменте «Прикладная Физика и Информатика», научно-исследовательская лаборатория «Физика Полупроводников», Государственный Университет Молдовы.

Научный руководитель:
Гашин П.А., доктор хабилитат физико-математических наук, профессор
Научный консультант,
Акимова Е.А., доктор хабилитат физических наук, доцент

Официальные оппоненты:
ЦУРКАН Владимир, доктор хабилитат физико-математических наук, чл.-корр. АНМ
ВЕРЛАН Виктор, доктор физико-математических наук, доцент

Состав специализированного научного Совета
НЕДЕОГЛО Дмитрий, **председатель**, доктор хабилитат физико-математических наук, профессор
КОЖОКАРУ Ион, **учёный секретарь**, доктор физико-математических наук
КУЛЮК Леонид, доктор хабилитат физико-математических наук, акад. АНМ
ЗАЛАМАЙ Виктор, доктор физико-математических наук, доцент
ШИКИМАКА Ольга, доктор физико-математических наук, доцент
КУРМЕЙ Николай, доктор физических наук

Защита состоится 24 . июня 2025г. в 15.00 часов на заседании специализированного научного Совета D 134.01-25-18 в Институте Прикладной Физики Государственного Университета Молдовы (ул. Академией 5, ауд. 230, Кишинёв, MD-2028, Молдова).

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Государственного Университета Молдовы (ул. А. Матеевич, 60, Кишинёв, MD-2009, Молдова) и на сайте C.N.A.A. (www.cnaa.md).
Автореферат разослан 23 . мая .2025

Учёный секретарь специализированного научного совета,
доктор физико-математических наук, **КОЖОКАРУ И.**

Научный руководитель,
доктор хабилитат физико-математических наук, профессор **Гашин П.**
Научный консультант,
доктор хабилитат физических наук, доцент **Акимова Е.**

Автор : **АЛЬ-КАССЕМ АМДЖАД**

© АЛЬ-КАССЕМ АМДЖАД , 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ……...…… 3

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ…… 4

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ…… 8

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ…… 20

РЕКОМЕНДАЦИИ……22

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ……...…… 23

СПИСОК ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ……...…… 25

ADNOTARE…… 26

ANNOTATION……..……27

АННОТАЦИЯ……...…….28

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и важность

Проблема развития солнечной энергетики носит глобальный характер и является весьма актуальной задачей для изучения. Широкое внедрение наземной солнечной энергетики возможно лишь при существенном снижении стоимости электроэнергии, полученной за счет преобразования энергии солнечного излучения. Тонкопленочная технология имеет большие потенциальные возможности для снижения стоимости солнечных модулей. Темпы снижения стоимости производства тонкопленочных солнечных модулей значительно выше, чем модулей на основе монокристаллического кремния. На сегодняшний день кроме аморфного гидрогенизированного и микрокристаллического кремния разработано несколько типов тонкопленочных фотоэлементов, как находящихся на стадии исследований и экспериментов, так и успешно применяемых в различных областях человеческой деятельности. С начала 50-х годов прошлого века теллурид кадмия (CdTe) был известен как перспективный материал для солнечной энергетики. У него почти идеальная ширина запрещенной зоны (1,45 эВ, 300 K) и очень высокая способность к поглощению ($> 10^5$ $см^{-1}$) солнечного излучения [1]. Несколько десятилетий спустя было обнаружено, что тонкий слой из сульфида кадмия (CdS), нанесенный на поверхность слоя CdTe приводит к увеличению эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую от 5% до 8% [2,3]. Пленки CdTe достаточно дёшевы в изготовлении. Увеличение эффективности CdS/CdTe СЭ является важной целью для всех специалистов в области альтернативной энергетики [4]. В настоящее время для создания более конкурентоспособных CdS/CdTe тонкопленочных солнечных элементов требуется решение ряда проблем связанных с: (a) коротким временем жизни неосновных носителей заряда вследствие рекомбинации электронно-дырочных пар в дефектных центрах в слое CdTe на границе между CdS и CdTe; (b) недостаточной прозрачностью проводящего оксида и CdS слоев; (c) отсутствием хорошего омического контакта между слоями CdTe и тыльными контактами; и (d) возможностью легирования слоев p-CdTe типа стабильным образом [5]. Согласно отчетам First Solar, Inc. было достигнуто рекордного уровня эффективности 22.1% СЭ, и 18.2% эффективности для солнечных модулей [6,7]. Теоретический расчет для таких элементов составляет 28-30% [8,9]. При изготовлении СЭ на основе тонкопленочного гетероперехода (ГП) nCdS/pCdTe актуальным становится исследование свойств границы раздела. Определение параметров границ раздела является

неотъемлемой частью исследований, направленных на повышение эффективности преобразования солнечных элементов.

Главной целью работы является разработка технологии получения солнечных элементов на основе тонких пленок соединений группы A_2B_6 и проведение комплексного исследования свойств границ раздела с целью определения методов повышения эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую.

Для достижения сформулированной цели диссертационной работы необходимо было решить следующие задачи:

1. Изучить особенности эпитаксии полупроводниковых соединений группы A_2B_6 методом квазизамкнутого объёма и разработать методы оптимизации режимов получения тонких пленок CdS, CdTe.
2. Исследовать основные электрофизические процессы, влияющие на эффективность солнечных элементов.
3. Разработать технологию создания изолирующего нанослоя CdO на границе раздела CdS/CdTe.
4. Исследовать электрические свойства гетеропереходов CdS/CdTe и CdS/CdO/CdTe, используя комплексный подход, включающий анализ ВФХ, ВАХ характеристик и адмиттанс-спектроскопию при различных температурах и частотах переменного сигнала.
5. Изучить влияние изолирующего нанослоя CdO на фотоэлектрические параметры солнечных элементов CdS/CdTe.

Объекты и методы исследований

Объектами исследования являются структура, оптические свойства и электронные процессы в тонких пленках полупроводников CdS, CdTe, CdO и фотоэлектрические свойства солнечных элементов на их основе. Основными методами исследования являются рентгеноструктурный анализ на дифрактометре Empyrean (PANalytical), сканирующая электронная микроскопия (SEM) на электронном микроскопе MERLIN (Carl Zeiss, Германия), спектрофотометрический анализ (прозрачность, поглощение) на UV-Vis спектрофотометре Cary 300 (Varian, США), функционирующего в диапазоне длин волн λ=190 –1100 нм, измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и вольт-фарадных характеристик (ВФХ),темновых и при освещении, с помощью измерительного комплекса Keithley2400 и адмиттансной спектроскопии на измерителе иммитанса Agilent E4980A. Математическая обработка результатов исследования была осуществлена с использованием программ Ориджин 9.5. Основным методом оценки достоверности

расчетных результатов явилось их сравнение с экспериментальными и приведенными в литературе данными.

Научная новизна и оригинальность результатов.

1. Определены оптимальные режимы (температура подложки, температура термоотжига, температура испарителя, толщина) получения пленок CdS и CdTe с высоким качеством микрокристаллической структуры, характеризующимся размером кристаллических зерен 2-10 мкм, и их доминирующей ориентацией вдоль кристаллографических направлений [002] и [111], соответственно.

2. Разработан технологический режим (парциальное давление кислорода > 10 мол%, температура подложки 100^{o}C) получения изолирующего нанослоя CdO методом магнетронного распыления и определена оптимальная толщина нанослоя CdO для получения тонкопленочных СЭ с токами короткого замыкания и напряжениями холостого хода выше на 25%, чем без нанослоя.

3. Внедрение изолирующего нанослоя CdO, толщиной 8-10 нм, методом магнетронного распыления между фронтальным CdS и поглощающим CdTe слоями, уменьшает плотность поверхностных состояний с N_{ss} = 3.5·10^{14} см$^{-3}$ эВ$^{-1}$ для ГП CdS/CdTe до N_{ss} = 9,2·10^{13} см$^{-3}$ эВ$^{-1}$ для ГП CdS/CdO/CdTe, увеличивая ток короткого замыкания с 15,7 мА/см^{2} до 26,5 мА/см^{2} и напряжение холостого хода с 0,66 В до 0,77 В, тем самым повышая коэффициент полезного действия с 3,8 % до 8,9 %.

Основная научная задача, решенная в диссертации, заключается в том, что впервые проведен широкий комплекс электрических исследований ГП CdS/CdTe и продемонстрировано, что одним из методов увеличения концентрации свободных дырок (увеличение концентрации собственных акцепторных дефектов вакансий кадмия, V_{Cd}), является внедрение изолирующего нанослоя CdO на границе раздела CdS/CdTe гетеропереходных фотопреобразователей.

Положения, выносимые на защиту

1. Для повышения кпд СЭ на основе структуры CdS/CdO/CdTe определены оптимальные толщины составляющих слоев: фронтальный CdS слой - 480 нм, диэлектрический i-CdO слой - 8÷10 нм и поглощающий CdTe слой - 8÷10 мкм, которые были получены оптимизацией режимов получения бинарных соединений технологией квазизамкнутого обьема.

2. Установлены фотовольтаические параметры СЭ CdS/CdO/CdTe в зависимости от толщины i-CdO слоя, полученного методом магнетронного распыления, указывающие, что оптимальный по толщине слой i-CdO осаждается при парциальном давлении

кислорода 1,2 х 10^{-3} Торр и Т=100^{o}С. Дальнейшее увеличение парциального давления кислорода и температуры подложки при синтезе пленок приводит к изменению структуры пленки от аморфной к мелкокристаллической.

3. Нанесение диэлектрического нанослоя CdO на границе раздела CdS/CdTe, при парциальном давлении кислорода 1,2х10^{-3} Торр, температуре подложки 100^{o}С, толщиной 8÷10 нм способствует росту тока короткого замыкания и напряжения холостого хода на 20 - 25 %, соответственно повышая эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую с 3,8 % до 8,9 %.

4. Установлено путем комплексного исследования вольтамперных, вольтфарадных характеристик и адмиттанс спектроскопии при различных температурах и частотах, что транспорт носителей заряда в СЭ CdS/CdO/CdTe, осуществляемый посредством генерационно-рекомбинационного механизма, характеризуется следующими энергиям активации 0,45 эВ и 0,27 эВ для CdS/CdTe и 0,25 эВ CdS/CdO/CdTe.

Практическая ценность

Разработаны оптимальные режимы (температуры подложки, термоотжига и испарителя) для получения пленок CdS и CdTe стехиометрического состава с высоким качеством кристаллической структуры, и технологический режим для получения, изолирующего нанослоя CdO методом магнетронного распыления для получения тонкопленочных СЭ с улучшенными функциональными характеристиками. Эта технология может быть успешно применена для создания на стеклянных и гибких подложках фоточувствительных полупроводниковых тонкопленочных солнечных элементов. Такие солнечные элементы, созданные на гибких подложках благодаря рекордным значениям электрической мощности на единицу веса приборной структуры, могут найти свое применение для работы небольших электронных устройств с автономным питанием (автоматические пункты системы связи, системы метеонаблюдений, системы наблюдения и контроля движения на автострадах, навигационные и сигнальные знаки и т.д.).

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы обсуждались на научных семинарах в Молдавском госуниверситете, а также докладывались на следующих научных конференциях:

1. Научная конференция МолдГУ «Интеграция через исследования и инновации». Кишинев, Молдова, 26-28 сентября 2013 г, 128-129. ISBN 978-9975-71- 417-4

2. 7-я Международная конференция по материаловедению и физике конденсированных сред, MSCMP, Кишинев, Молдова, 16-19 сентября 2014 г. (Abstracts book of the 7th

International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, MSCMP, Chisinau, Moldova, September 16-19, 2014, p. 273).

3. 36-я Европейская конференция и выставка фотоэлектрической солнечной энергии, Франция, 2019 (The 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, France 2019), pp. 673-677.

4. Международная конференция по нанотехнологиям и биомедицинской инженерии ICNBME 2019: 4th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering pp 707-711, Conference paper First Online: 18 September 2019, 910 Accesses, Part of the IFMBE Proceedings book series (IFMBE, volume 77).

5. Научная конференция «Интеграция через исследования и инновации». Кишинев, Молдова, 10-11 ноября 2020 г, 290-293. CZU: 538.975.621.383

6. Virtual Conference, Spring Meeting 2022 "Sputtered CdO nanolayer as an interface engineering approach to CdTe solar cells", European Materials Research Society.

По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе две статьи в национальных журналах, рекомендованных ANACEC и 4 в сборниках международных конференций. Список приведен в конце диссертации.

Структура работы.

Диссертационная работа написана на русском языке и состоит из введения, пяти глав, общих выводов, приложения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 132 страницах и содержит 68 рисунков, 12 таблиц, 65 формул и 171 ссылок на цитируемые публикации, включая работы, в которых опубликованы результаты данной диссертации.

Ключевые слова: Сульфид кадмия (CdS), теллурид кадмия (CdTe), гетеропереход (ГП), солнечный элемент (СЭ), квазизамкнутый объем (CSS), оксид кадмия (CdO).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** раскрыта актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована ее главная цель и решаемые в ней задачи, сформированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационной работы приводится анализ литературных данных о структуре, физических свойствах полупроводниковых пленок CdS и CdTe и методах их получения, а также гетеропереходах на их основе. Рассматриваются основные физико-химические свойства пленок CdS и CdTe (кристаллическая структура, ширина запрещенной зоны, оптические переходы), полученные из экспериментальных исследований. В отдельные параграфы выделены технологические методы получения данных пленок, гетеропереходов на их основе и методы исследования их электрических и

фотоэлектрических свойств. В настоящее время для создания более конкурентоспособных CdS/CdTe тонкопленочных солнечных элементов требуется решение ряда проблем, связанных с: коротким временем жизни неосновных носителей заряда вследствие рекомбинации электронно-дырочных пар в дефектных центрах в слое CdTe на границе между CdS и CdTe; недостаточной прозрачностью проводящего оксида (ТПО) и CdS слоев; отсутствием хорошего омического контакта между слоями CdTe и тыльными контактами. Достижение концентрации дырок $p > 10^{17}$ $см^{-3}$ в слоях p-CdTe является одним из необходимых условий для изготовления эффективных солнечных элементов. Технология квазизамкнутого объема (CSS) является одним из наиболее эффективных способов выращивания слоев CdTe и CdS с воспроизводимыми физическими характеристиками.

Вторая глава посвящена методике и технике эксперимента для получения пленок CdS, CdTe и CdO, дано обоснование выбора методов CSS и магнетронного распыления для получения названных слоев. На рис. 1 показана блок-схема технологии квазизамкнутого объема.

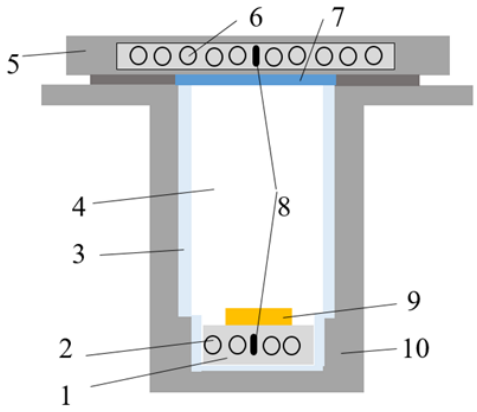


Рис.1 Модифицированная система метода CSS для изготовления тонких пленок CdS и CdTe. 1- блок источника; 2 - нагреватель источника; 3 - кварцевая труба; 4 - замкнутый объем; 5 - блок подложки; 6 - нагреватель подложки; 7 – подложка; 8 - термопары, 9 - CdS или CdTe.; 10- графитовый блок.

Метод CSS имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами, такие как: а) высокие темпы осаждения, что делает его привлекательным для производственных целей; б) температуры процесса напыления (источника и подложки), не приводящие в ГП CdS/CdTe к взаимной диффузии компонентов, которая ухудшает качество границы раздела; в) закрытый объем камеры ограничивает выход компонентов соединения из зоны термодинамического процесса; г) малый объем закрытой камеры обеспечивает высокую

плотность пара, улучшая стехиометрию и кристаллическую структуру пленок [10]. В системе реактора предусмотрен чёткий контроль температур испарителя и подложки, что обеспечивает регулируемый режим изготовления полупроводниковых пленок.

Для получения пленок CdO использовался метод магнетронного распыления кадмиевой мишени. Рабочий газ подводился непосредственно к мишени по специальному каналу в корпусе камеры, причем давление газа (O_2) контролировалось отдельным устойством. На рис.2 приведена камера для получения пленок CdO методом магнетронного распыления.

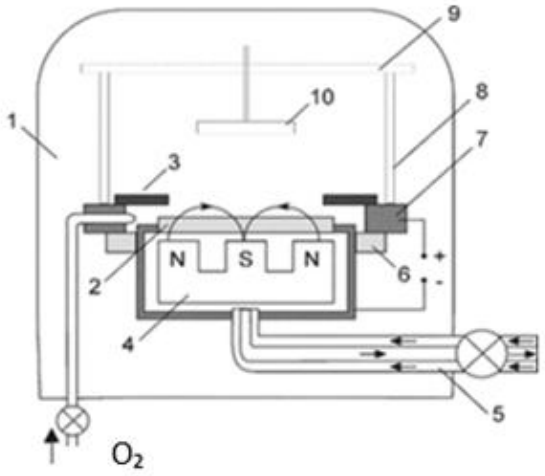


Рис.2 Блок-схема магнетронного распылительного устройства МРУ. 1-корпус; 2- катод-мишень; 3- анод; 4- магнитная система; 5- система откачки; 6-прокладки; 7- рабочий столик, 8- камера из кварцевого стекла; 9- крышка;10-подложка

Описаны методы исследования морфологии поверхности с помощью атомно силового микроскопа и растровой электронной микроскопии и рентгеноструктурный анализ (XRD) для исследования структуры вещества. Также изложены методика измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) и вольтфарадных характеристик (ВФХ) гетеропереходов. Эффективным методом характеристики гетероструктур является спектроскопия адмиттанса, которая включает стационарное вольт-фарадное профилирование и температурные спектры проводимости. Использование таких методов получения слоев и методик исследования их свойств позволяет сделать следующие выводы:

1. Используемый метод квазизамкнутого объема (CSS) позволяет выращивать пленки в условиях, близких к равновесным, и добиваться высокой степени их кристалличности. Метод CSS является более экономичным и воспроизводимым.

2. Основными параметрами процесса магнетронного напыления пленок являются температура подложки, расстояние мишень-подложка и соотношение напряжения разряда и давления распыляющего газа U/P. При заданном токе разряда скорость роста пленок существенно коррелирует с напряжением, которое в свою очередь определяется концентрацией кислорода в поверхностном слое мишени.

3. Для определения электрофизических свойств слоев применяются различные методы и приборы. Атомно-силовой микроскоп и сканирующий электронный микроскоп используются для исследования морфологии поверхности слоев. Рентгеноструктурный анализ необходим для изучения структуры вещества. Оптическая спектроскопия применяется для исследования внутренней структуры атомов и молекул вещества.

4. Измерение вольтамперных характеристик (ВАХ) в темноте и при освещении и вольтфарадных характеристик (ВФХ) являются основными приемами для изучения электрических свойств ГП. Из анализа этих характеристик можно оценить пригодность ГП для создания высокоэффективных солнечных элементов.

5. Спектроскопия адмиттанса, включает стационарное вольт-фарадное профилирование и температурные спектры проводимости и является эффективным методом характеризации гетероструктур. Эта методика позволяет с высокой точностью определять все основные параметры гетероструктур: разрыв энергетических зон, энергетические уровни электронов, концентрацию носителей заряда, профиль дна зоны проводимости и валентной зоны.

В третьей главе представлены результаты исследований слоев CdS, CdTe, и CdO. Слои CdS являются оптическим окном для барьерных структур на базе CdTe. Основные исследовавния слоев CdS изготовленных методом квазизамкнутого объема проводились с точки зрения оптического пропускания. На рис.3 приведены спектры пропускания CdS с разной толщиной.

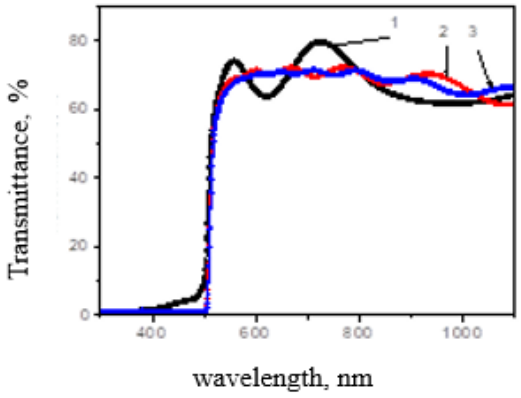
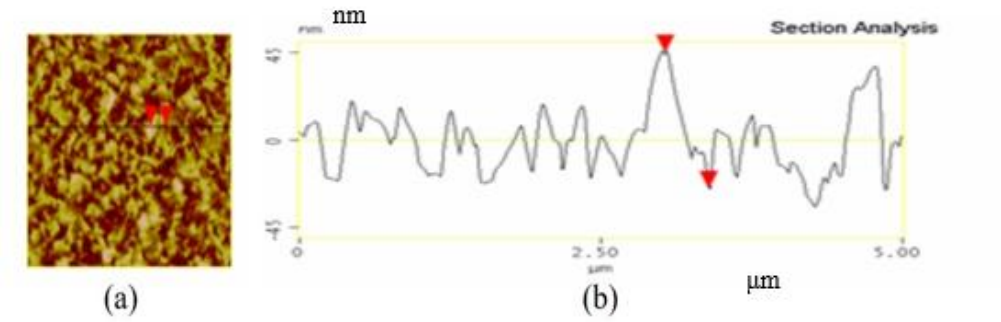


Рис. 3 Спектры пропускания слоев CdS с разными толщинами, d, мкм:1-0,48; 2-1,04; 3-1,37.

Максимальное пропускание (Т) 80% достигается для слоя CdS толщиной 0,48 мкм. Поверхность слоя CdS не гладкая и изображение, полученное атомно-силовым микроскопом, показало, что максимальная толщина вариации вдоль CdS слоя составляет 70 нм (рис.4).



Surface distance 373,56 нм Horizon distance (L) 361,33 н

Vert distance 69,931 нм Angle 10,954º

Рис.4 Изображение поверхности слоя CdS, снимаемого с помощью атомно-силового микроскопа (a), и (b) профиль поверхности плѐнки с выделением кривой, соответствующей шероховатости.

Слой CdTe, полученый также методом квазизамкнутого объема, является основным рабочим слоем изучаемой гетероструктуры, так как все физические процессы, обусловливающие эффективность устройства, происходят в нём. Исследование влияния температуры источника и подложки на электрофизические свойства позволило определить оптимальные технологические режимы для слоёв CdS и CdTe, температуры для CdS $T_{ист}$= 630°C, $T_{под}$=340°C, а для CdTe, $T_{ист}$=580 °C, $T_{под}$=340 °C. Важным условием для пленок CdTe является хлоридная обработка, котороя приводит к увелечению размера зерен пленок CdTe, значительному снижению удельного сопротивления и повышению фоточувствительности слоев. Определены время и температуры, необходимые для стабилизации свойств слоев после процесса хлоридной обработки. На основании отработанной технологии получения слоев CdS и CdTe был изготовлен ГП CdS/CdTe.

Разработана технология получения слоев CdO методом магнетронного распыления пластины кадмия в атмосфере кислорода на постоянном токе (Таблица 1).

Таблица 1 Параметры осаждения тонких пленок CdO

Расстояние мишень-подложка	30-35 мм
Давление распыления	Давление рабочего газа в раб. камере (3-4) x10^{-3} мм рт. ст.
Газовая смесь	O_2
Ток распыления	10-15 мА/см^2
Катодный потенциал	100-150 В
Температура подложки	100° С
Время распыления	10-20 с

Слои CdO были прозрачны в области (330-1000) нм с шириной запрещенной зоны 3,75 эВ. Толщина слоя CdO контролировалась временем распыления и рассчитывалась с помощью градуированной кривой зависимости толщины слоя от времени распыления. Скорость роста слоя составляла 5 Å/с.

По разработанным технологиям получения слоев, нанометрический слой CdO наносился между слоями CdS и CdTe на половину поверности слоя CdS. В результате получены две структуры ITO/CdS/CdTe/Ni и ITO/CdS/CdO/CdTe/Ni (рис.5).

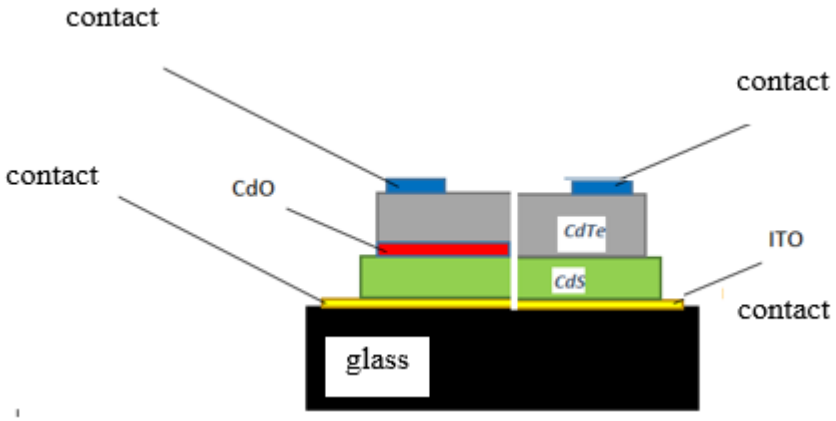
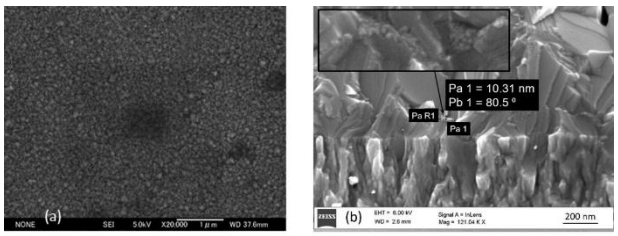


Рис. 5 Схематическое изображение двух гетеропереходов (CdS/CdO/CdTe) и (CdS/CdTe)

Нанесенный на CdS тонкий слой CdO толщиной около 8-10 нм покрывает поверхность слоя CdS, сглаживает рельеф поверхности, поверхность становится более однородной и помогает блокировать диффузию примесей из CdS в слой CdTe.



(a) (b)

Рис. 6 SEM-изображение CdO, нанесенного на тонкую пленку CdS (a), и изображение поперечного сечения структуры TCO/CdS/CdO/CdTe (б). На вставке изображения

поперечного сечения гетероструктуры CdS/CdO/CdTe показано неравномерное накопление CdO на границе раздела.

Омическими контактами для исследования электрофизических свойств структур служили слои Ni и Sb_2Te_3/Ni. Таким образом, разработан технологический маршрут поэтапного изготовления СЭ с тыльной конфигурацией на основе структуры стекло/ITO/*n*-CdS/CdO/*p*-CdTe/ Sb_2Te_3/Ni.

В четвертой главе представлены исследования электрических свойств ГП-ов CdS/CdTe и CdS/CdO/CdTe в интервале рабочих температур. Изучение ВАХ показала, что такая зависимость характерна для механизма генерации–рекомбинации Саа–Нойса–Шокли в области пространственного заряда (ОПЗ) диодной структуры, согласно которой прямой ток определяется рекомбинацией через уровни примесей (дефектов), и описывается на основе модели Саа–Нойса–Шокли, соотношением (1):

$$I_{gr} = I_{gr}^{0}\left[exp\left(\frac{eV}{nKT}\right) - 1\right] \quad (1)$$

где I^0_{gr} — генерационно-рекомбинационный ток насыщения при напряжении U = 0.

$$I_{gr}^{0} = \frac{q\alpha n_i}{\tau_{0t}} \quad (2)$$

где n_i — собственная концентрация носителей заряда в CdTe ($n_i = 1{,}2 \cdot 10^{12} см^{-3}$ при T= 300 К) [11]), $\alpha=kT/qE$ - эффективная ширина области рекомбинации, E - напряженность электрического поля в *p-n* переходе. Определены токи насыщения, и они составляют при 303 К: $1{,}5\cdot10^{-10}$ А для CdS/CdTe и $1{,}35\cdot10^{-10}$ А для CdS/CdO/CdTe. Времена жизни при введении нанослоя i-CdO существенно не меняются согласно выражению (2), что свидетельствует о том, что все физические процессы переноса тока происходят в слое CdTe, а нанослой CdO является как бы стабилизатором потерь неосновных носителей тока.

Исследование ВАХ при различных температурах (77-333) К показало, что коэффициент n меняется, что свидетельствует о высокой концентрации центров захвата в ОПЗ диодной структуры [12]. Температурная зависимость высоты потенциального барьера гетеропереходов CdS/CdTe и CdS/CdO/CdTe хорошо описывается уравнением (3):

$$\varphi_0(T) = \alpha_0(0) - \alpha_\varphi T \quad (3)$$

где α_0 = 3,92 х 10^{-3} эВ · $К^{-1}$ и α_ϕ = 3,44 х 10^{-3} эВ $К^{-1}$ - температурные коэффициенты. Большие значения α_ϕ и $\alpha_0(0)$ обусловлены высокой концентрацией поверхностных состояний (N_{ss}) на границе раздела гетероперехода. С ростом температуры высота потенциального барьера уменьшается линейно для обеих структур в интервале температур выше комнатной. Большие значения концентрации поверхностных состояний вызывают

большие значения тока насыщения. Температурная зависимость тока насыщения $\ln(I_o)$ = $f(10^3/T)$ для ГП CdS/CdTe и для CdS/CdO/CdTe приведена на Рис. 7. Рассчитанная из температурной зависимости $\ln(I_o)$ = $f(10^3/T)$ глубина расположения энергетических уровней соответствует энергиям активации 0,45 эВ и 0,27 эВ для CdS/CdTe и 0,25 эВ CdS/CdO/CdTe.

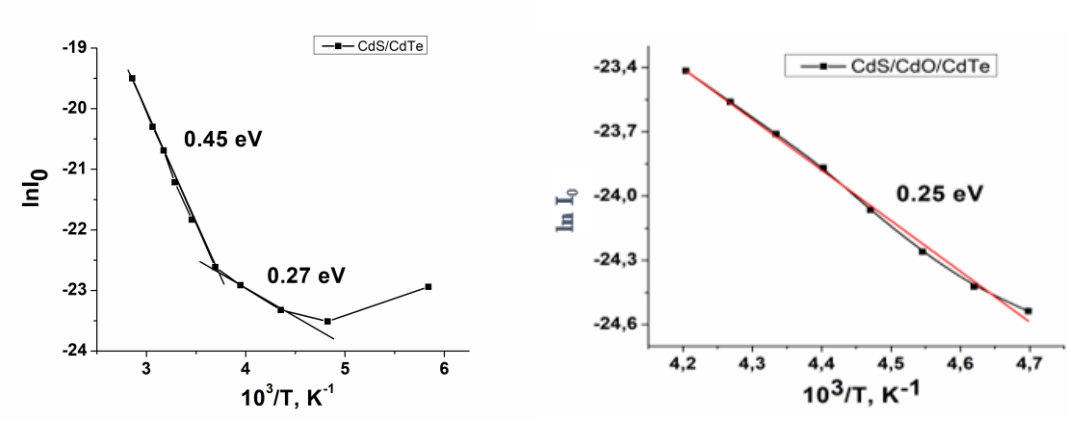


Рис.7 Температурная зависимость тока насыщения $\ln(I_o)$ = f $(10^3/T)$ для ГП CdS/CdTe и для CdS/CdO/CdTe

Анализ ВАХ в обоих типах структур позволяет предположить существование одного двухуровневого рекомбинационного центра для CdS/CdTe и о наличии одноуровневого центра для CdS/CdO/CdTe [13].

Емкостные измерения изучались для определения: концентрации легирующей примеси в активном слое гетероструктур; высоты потенциального барьера на p-n переходе; толщины p-n перехода; величины напряженности электрического поля в p-n переходе; параметров поверхностных уровней. Исследованы зависимости емкости от частоты в темноте, 300 K при напряжении V = 0 и V = 0,5 В (рис. 8). Для частот от 100 кГц до 2 МГц емкость практически не зависит от частоты.

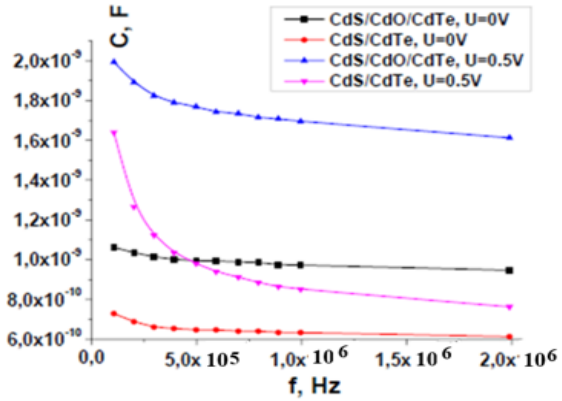


Рис. 8 Частотные характеристики ГП CdS/CdTe и CdS/CdO/CdTe при комнатной температуре.

Емкость гетероперехода CdS/CdO/CdTe, показывает более высокие значения по сравнению с ГП CdS/CdTe. Уменьшение емкости с ростом частоты указывает на существование поверхностных уровней на границе раздела CdS/CdTe.

Из ВФХ измерений расссчитаны электрические параметры ГП-ов при высоких частотах (Таблица 2).

Таблица 2 Электрические параметры для гетеропереходов CdS/CdO/CdTe и CdS/CdTe при низкой и высокой частоте.

	0,1 МГц			1 МГц		
Образец	**U_{DC}, В**	**N_{cv}, см$^{-3}$**	**W, мкм**	**U_{DC}, В**	**N_{cv}, см$^{-3}$**	**W, мкм**
15G17 CdS/CdTe	0,51	1,1 x 10^{13}	5,3	0,83	4,5 x 10^{13}	5,6
6G87 CdS/CdO/CdTe	0,58	3,8 x 10^{13}	5,0	1,02	5,3 x 10^{13}	4,7
16G87 CdS/CdTe	0,54	2,4 x 10^{13}	5,2	0,87	4,5 x 10^{13}	4,9

Из ВФХ был рассчитан профиль распределения концентрации ионизированной примеси для двух ГП-ов CdS/CdTe и CdS/CdO/CdTe (рис.9).

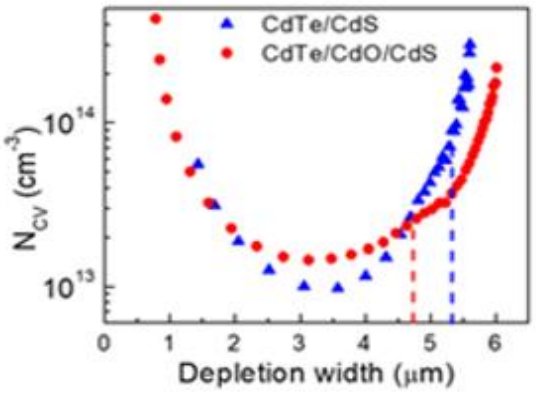


Рис. 9 Сопоставление профилей распределения носителей заряда для ГП CdS/CdO/CdTe и CdS/CdTe, полученных из измерений ВФХ при разных температурах на частоте 1 МГц.

Увеличение концентрации ионизированной примеси в ГП CdS/CdO/CdTe связывают с уменьшением плотности состояний на границе раздела благодря слою CdO. Была оценена плотность поверхностных состояний: N_{ss} = 3.5·10^{14} см$^{-3}$ эВ$^{-1}$ для ГП CdS/CdTe и N_{ss} = 9,2·10^{13} см$^{-3}$ эВ$^{-1}$ для ГП CdS/CdO/CdTe и времени перезарядки τ =3,24 мкс и τ =1,35 мкс, соответственно. Для ГП CdS/CdO/CdTe плотность состояний на границе CdS/CdO и CdO/CdTe снижается за счет насыщения оборванных связей атомов на поверхности атомами кислорода.

Был применен метод температурной и частотной спектроскопии адмитанса, который учитывает динамические характеристики примесных уровней. Температурные спектры

адмитанса ГП CdS/CdO/CdTe (рис.10) обладают максимумом, который обусловлен переходом из низкочастотного в выскочастотный режим измерений.

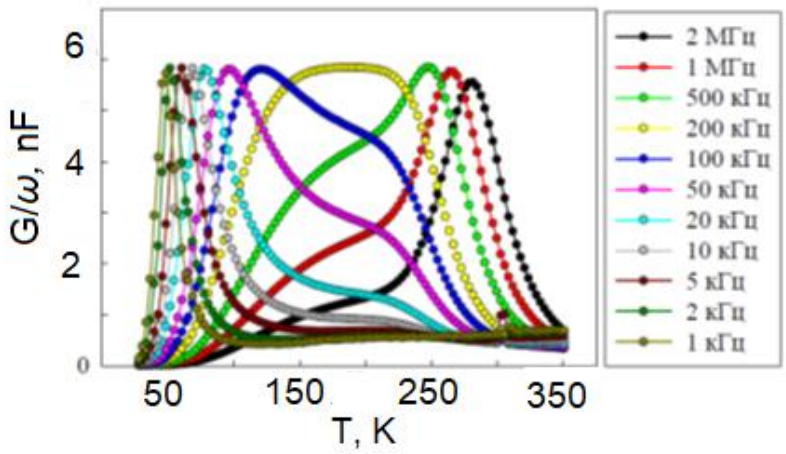


Рис. 10 Температурная и частотная зависимости проводимости для ГП CdS/CdO/CdTe.

Положение максимума определяется соотношением $2\pi f_0\tau = 1$. Построение зависимости $\ln(\omega_0/T^2)$ от 1/T позволило определить энергию ионизации примеси (рис.11).

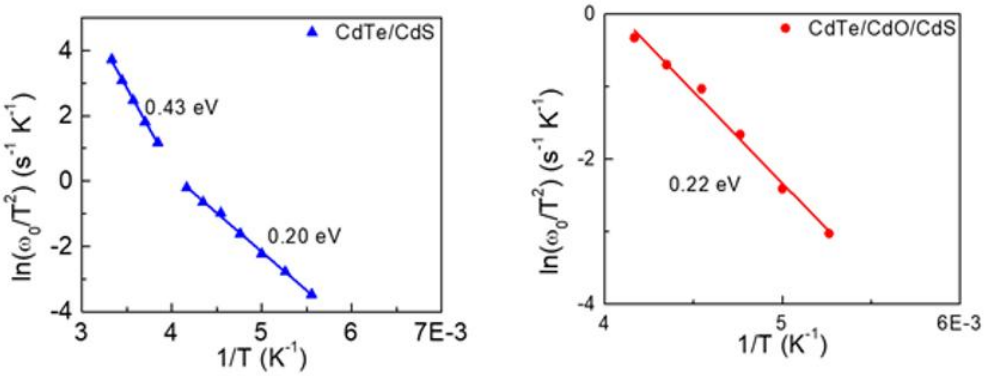


Рис. 11 Графики Аррениуса, построенные по температурной зависимости частот $\ln(\omega_0/T^2)$ =f(1/T) для ГП CdS/CdTe и ГП CdS/CdO/CdTe

Из данных зависимостей определили наличие двух уровней дефектов для CdS/CdTe и один дефектный уровень для устройств CdS/CdO/CdTe. Было обнаружено, что в ГП CdS/CdTe имеются два уровня с энергиями ионизации 0,20 эВ и 0,43 эВ, а в ГП CdS/CdO/CdTe наблюдается только дефектный уровень с энергией 0,2 эВ, значения которых хорошо согласуются с литературными данными.

Типичные концентрации легирующих примесей ~10^{13}–10^{14} $см^{-3}$ для поликристаллического CdTe, ограничены количеством V_{Cd}, присутствующим в CdTe [14].

В пятой главе исследованы фотоэлектрические свойства гетероструктур CdS/CdTe и ГП CdS/CdO/CdTe в режиме фотопреобразователя и дан сравнительный анализ параметров

изучаемых гетеропреходов. Исследования ВАХ показывают, что введение нанослоя диэлектрика CdO между слоями CdS и CdTe приводит к существенному увеличению как тока короткого замыкания, так и напряжения холостого хода и, следовательно, и к увеличению эффективности. Рост FF указывает на улучщение условий разделения носителей на границе раздела CdS и CdTe. Существенную роль играет толщина нанослоя CdO (рис.12). Толшина CdO (8-10) нм является наилучшей для ГП CdS/CdTe.

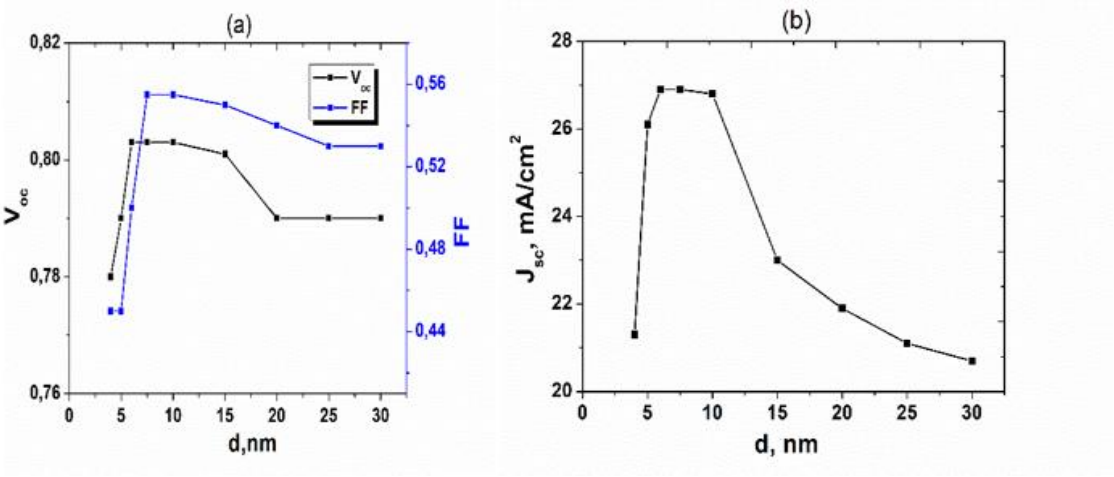


Рис.12. Эмпирическая зависимость U_{xx} (a) и $J_{кз}$, (b) от толщины нанослоя CdO. При токе разряда 10 мА и толщинах 8-12 нм получены СЭ с промежуточным слоем CdO со следующими параметрами: U_{xx} = 0,800-0,824 В, $J_{кз}$ =25-26 мА/см^2 , FF=0,490-0,590, η=9,8-13,3 %.

Исследованы ВФХ структуры CdS/CdO/CdTe при освещении 100 мВт/см^2 при частоте сигнала 1 МГц. Наличие области насыщения на ВФХ позволило оценить эффективную толщину слоя CdO. Наибольшее изменение емкости при освещении образцов наблюдается при нулевом или очень малом прямом смещении. Такое поведение фотоемкости характерно для поверхностного емкостного эффекта [15]. В данном случае поверхностный эффект имеется ввиду поверхность раздела CdS/CdO/CdTe. Таким образом, на поверхности раздела CdS/CdO/CdTe присутствует достаточно высокое содержание поверхностных состояний, которые и приводят к такому эффекту. Из зависимости $1/C^2$= f(V) можно рассчитать концентрацию носителей заряда в соответствии с выражением (4):

$$N(W) = -\frac{2}{q\varepsilon A^2}\left[\frac{d\left(\frac{1}{C^2}\right)}{dV}\right]^{-1} \qquad (4)$$

где A-площадь элемента, $\varepsilon=\varepsilon_r\varepsilon_0$-диэлектрическая проницаемость, ε_r(CdTe)=10,6, ε_0= 8,85·10^{-14} Ф/м, q-заряд электрона. Получено значение N(W) = (1,07-2,35)·10^{13} см$^{-3}$. Это значение концентрации носителей тока в области объемного заряда, но вся область

объемного заряда находится в слое CdTe, следовательно, это концентрация в слое CdTe вблизи границы раздела CdS/CdO/CdTe. Спектральная чувствительность структур простирается на область 0,5-0,86 мкм (рис.13).

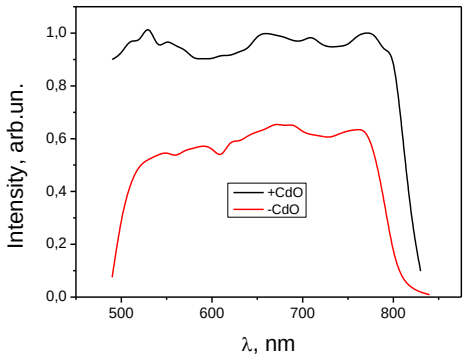


Рис. 13 Спектральная зависимость фоточувствительности ГП CdS/CdTe и CdS/CdO/CdTe от длины волны.

Введение нанослоя CdO существенно повышает обсолютную величину фотоответа, слабо меняя область чувствительности, которая ограничена шириной запрещенной зоны CdS ΔE=2,44 эВ и шириной запрещенной зоны CdTe ΔE=1,45 эВ. Для структуры CdS/CdO/CdTe был рассчитан квантовый выход, и он варьируется в интервале от 0,53 до 0,80 в зависимости от мощности излучения для монохроматического света с длиной волны λ=532 нм.

На основании проведенных исследований гетеропереходов CdS/CdO/CdTe получены параметры ГП, позволяющие построить его энергетическую диаграмму (таблица 3).

Таблица 3 Параметры компонент ГП, позволяющие построить его зонную диаграмму.

	CdS	**CdTe**	**CdO**
Ширина запрещенной зоны. E_g, эВ	2. 44	1,45	3,11
Электронное сродство, ξ, эВ	4.5	4.28	
Эффективная масса, m^*	0.17 m_0	0.6 m_0	
Постоянная решетки, a, A	4.137	6.477	
Концентрация некомпенсированных доноров, N_d, $см^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{18}$		
Концентрация некомпенсированных акцепторов N_a, $см^{-3}$		$3.7 \cdot 10^{13}$	
Диэлектрическая проницаемость, ε	10	9.6	
E_C-E_f, эВ	0.12		
E_F- E_V, эВ		0.31	
Высота потенциального барьера, Δφ, эВ			0.82

На основании приведенных данных построенна энергетическая диаграмма(рис.14)

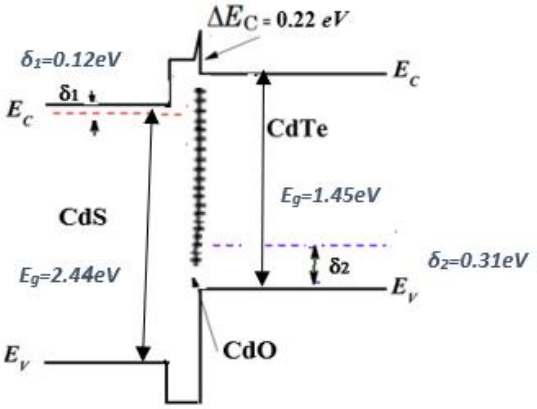


Рис.14 Энергетическая диаграмма гетероперехода CdS/ CdO/CdTe при освещении.

Роль нанослоя CdO заключается в сглаживании поверхности слоя CdS, тем самым приводя к уменьшению количества центров активной рекомбинации носителей тока на границе раздела CdS/CdO/CdTe.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В ходе проведения данной работы были рассмотрены электрофизические свойства пленок CdS, CdTe, полученных методом квазизамкнутого объёма, и СЭ на их основе с введением на границе раздела CdS/CdTe изолирующего нанослоя *i*-CdO, полученного методом магнетронного распыления, для повышения эффективности СЭ. Основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. На основе рентгеноструктурных, оптических, морфологических, электрофизических исследований определены оптимальные режимы получения пленок CdS и CdTe методом квазизамкнутого обьема, с высоким совершенством кристаллической структуры исследуемых слоев. Оптимальные технологические режимы для слоёв CdS: $T_{ист}$=630 °C, $T_{под}$=340 °C, а для CdTe, $T_{исп}$=580 °C, $T_{под}$=340 °C.
2. Разработана методика формирования СЭ CdS/CdTe, состоящего из прозрачного токопроводящего слоя на основе оксида индия-олова (ITO), слоя CdS толщиной 200-500 нм, базового активного слоя CdTe толщиной 8-10 мкм и заднего контакта на основе Te/Ni или Sb_2Te_3/Ni.
3. Отработана методика получения диэлектрического нанослоя CdO методом магнетронного распыления на постоянном токе из мишени Cd в атмосфере чистого кислорода. Скорость нанесения пленки CdO равна 5Å/s. Оптимальный режим нанесения пленки CdO составляет $I_{разряд}$=10 мА, давление O_2 в камере 10^{-3} мбар, время нанесения слоя 18-20 с.

4. Получены и исследованы гетероструктуры CdS/CdO/CdTe с промежуточным диэлектрическим слоем со следующими энергетическими параметрами: U_{xx}= 0,800-0,824 В, $J_{кз}$=26.5мА/см^2, *FF*=0,490-0,590, η = 9,8-13,3%.

5. Разработан технологический маршрут поэтапного изготовления СЭ тыльной конфигурации на основе структуры стекло/ITO/*n*-CdS/CdO/*p*-CdTe/ Ni.

6. Оптимизирован режим "хлоридной" и термической обработки CdTe, который позволяет получить пленки кубической структуры цинковой обманки с величиной зерен почти на порядок (от несколько десятков до нескольких сотен нанометров) больше, чем без данной обработки. В итоге, процесс хлорирования приводит к увеличению эффективности СЭ.

7. Исследованы темновые вольт-амперные характеристики и вольтфарадные характеристики изготовленных СЭ. Емкостной диффузионный потенциал несколько выше, чем токовый, как дляСЭ CdS/CdTe, так и для СЭ CdS/CdO/CdTe . Показано, что концентрация некомпенсированной акцепторной примеси в CdS/CdO/CdTe при частоте 0.1 MHz имеет значение $3.8\cdot10^{13}$ см$^{-3}$, а для ГП CdS/CdTe - $1.1\cdot10^{13}$ см$^{-3}$, плотность поверхностных состояний N_{ss} = 3.5 10^{14} см$^{-3}$ для ГП CdS/CdTe и N_{ss} = 9.2 10^{13} см$^{-3}$ для ГП CdS/CdO/CdTe,

8. Механизм токопрохождения при прямых смешениях для ГП CdS/CdTe и CdS/CdO/CdTe обусловлен генерацией-рекомбинацией носителей в области объемного заряда, а при обратных смешениях ток обусловлен поверхностными утечками.

9. Адмиттанс-спектроскопия выявляет для CdS/CdTe два дефектных уровня с энергиями ионизации 0,20 эВ и 0,43 эВ, а в гетероструктуре CdS/CdO/CdTe только уровень с энергией 0,22 эВ.

10. Установлено, что введение нанослоя CdO между слоями CdS и CdTe приводит к росту фотовольтаических параметров (в частности тока короткого замыкания и напряжения холостого хода) на 25-30 % и внешнего квантового выхода в пределах 0,80-0,75 в гетероструктуре CdS/CdO/CdTe.

РЕКОМЕНДАЦИИ

Учитывая вышеизложенные выводы, можно сделать следующие рекомендации:

Тонкопленочные солнечные элементы на базе пленок CdS/CdTe перспективны для широкомасштабного наземного применения благодаря устойчивости их к разложению, высокой эффективности фотоэлектрического преобразования солнечной энергии, низкой материало- и энергоемкости их промышленного производства. Солнечные панели CdS/CdTe особенно подходят для крупномасштабных солнечных проектов, предлагая убедительное сочетание экономической эффективности, хорошей эффективности, близкой к эффективности продуктов на основе кремния, и более простого производственного процесса, который обеспечивает быстрое массовое производство.

Солнечные панели CdS/CdTe также идеально подходят для работы в условиях высоких температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. JENNY, D.A., BUBE, R. H. Semiconducting Cadmium Telluride. In: *Physical Review*. 1954, nr 96(5), pp. 1190–1191. DOI:10.1103/physrev.96.1190
2. CUSANO, D.A. CdTe solar cells and photovoltaic heterojunctions in II–VI compounds. In: *Solid-State Electronics*. 1963, nr 6(3), pp. 217–232. DOI:10.1016/0038-1101(63)90078-9
3. ROMEO, A., ARTEGIANI, E. CdTe-Based Thin Film Solar Cells: Past, Present and Future. In: *Energies*. 2021, nr 14(6), pp. 1684. DOI:10.3390/en14061684
4. MOHAMED, H.A., HADIA, N.M.A. Improvement in the Efficiency of Thin Film CdS/CdTe Solar Cells Using Different TCO Materials. In: *International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM2013)*. 2014, pp. 107–118. DOI: 10.1007/978-3-319-05521-3_14
5. FANG, Z., WANG, X.C., WU, H.C., ZHAO, C.Z. Achievements and Challenges of CdS/CdTe Solar Cells. In: *International Journal of Photoenergy*. 2011, pp. 1–8. DOI: 10.1155/2011/297350
6. HE, S., LU, H., LI, B., ZHANG, J., ZENG, G., WU, L., … FENG, L. Study of CdTe/ZnTe composite absorbing layer deposited by pulsed laser deposition for CdS/CdTe solar cell. In: *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2017, nr 67, pp. 41–45. DOI: 10.1016/j.mssp.2017.05.009
7. *The 10 Stories That Defined Energy Storage in 2017*. Disponibil: https://www.greentechmedia.com/articles/read/first-solar-hits-record%2022.1conversion%20efficiency%20for%20CdTe%20solar%20cell
8. SZE, S. *Physics of Semiconductor Devices*. New York: JOHN WILEY & SONS, INC., 1981. 392 p. ISBN 978-0470-53794-7
9. КОСЯЧЕНКО, Л. А., САВЧУК, А.И., ГРУШКО, Е.В. Влияние толщины поглощающего слоя на эффективность солнечного элемента CdS/CdTe. In: *ФТП*. 2009, nr 43(8), pp.1060-1064.
10. БУБНОВ, Ю., ЛУРЬЕ, М., СТАРОС, Г., ФИЛАРЕТОВ, Г. *Вакуумное нанесение пленок в квазизамкнутом объеме*. Москва: Советское радио, 1975, 160 pp.
11. SONG, T., KANEVCE, A., SITES, J. R. Emitter/absorber interface of CdTe solar cells. In: *Journal of Applied Physics*. 2016, nr 119(23), pp. 233104. DOI: 10.1063/1.4953820
12. BONNET, D. THE CdTe THIN FILM SOLAR CELL - AN OVERVIEW. In: *International Journal of Solar Energy*. 1992, nr 12(1-4), pp. 1–14. DOI: 10.1080/01425919208909746
13. РЫВКИН С. М. *Фотоэлектрические явления в полупроводниках*. Москва, 1963. 494

14. BECERRIL, M., ZELAYA-ANGEL, O., VARGAS-GARCÍA, J. R., RAMÍREZ-BON, R., & GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, J. Effects of Cd vacancies on the electrical properties of polycrystalline CdTe sputtered films. In: *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2001, nr 62(6), pp. 1081–1085. DOI: 10.1016/s0022-3697(00)00284-5

15. ЛЕБЕДЕВ, А.А., СОБОЛЕВ, Н.А., ЭККЕ, В. Фотоемкость МДП структуры. In: *Физика и техника полупроводников.* 1981, nr 15(7), pp. 1438-1439.

LISTĂ LUCRĂRILOR PUBLICAȚII PE TEMA TEZEI

1. **AL-QASSEM, AMJAD**, ГАГАРА, Л., ГАШИН, П., ИНКУЛЕЦ, Й., ФЕДОРОВ, В. Фотоэлектрические параметры солнечных элементов CdS – CdTe с нанометрическим слоем CdO. In: *Integrare prin cercetare și inovare*. 2013, pp 128-129. ISBN 978-9975-71-417-4
2. **AL-QASSEM, AMJAD**, GASHIN, P., GAGARA, L., INCULETS, I., FEDOROV, V., CHETRUSH, P. Studies Of The Intermediate CdO Layer Influnce On Solar Energy Conversion In CdS/CdTe Heterojunction. In: *Abstracts book of the 7th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, MSCMP*. 2014, pp. 273.
3. **AL-QASSEM, AMJAD**, GASHIN, P., GAGARA, L., KETRUSH, P., INCULETZ, I., FIODOROV, V. Photoelectrical parametrs of nCdS-pCdTe thin- film solar cells with a CdO buffer layer. In: *Moldavian Journal of The Physical Sciences*. 2016, nr 15(1-2), pp. 54- 59
4. **AL-QASSEM AMJAD** Effect of heat treatment in presence of CdCl2 on the physical properties of pCdTe–nCdS heterojunction solar cells. In: *Studia Universitatis Moldaviae*. 2016, nr 7(97), pp. 166-169. ISSN 1857-2073, ISSN online 2345-1033
5. **AL-QASSEM, AMJAD**, FEDOROV, V., SUMAN, V., GAGARA, L., POTLOG, T. Improved photovoltaic parameters in CdTe solar cells by insertion of a i-CdO layer. In: *36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition Proceedings.* 2019, nr 1, pp. 673-677. ISBN: 978-1-7138-0353-9
6. **AL-QASSEM, AMJAD**, GAGARA, L., FEDOROV, V., POTLOG, T. Comparative Study of the p-CdS/n-CdTe Photovoltaic Devices with Depleted Intrinsic Layer. In: *4th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering Proceedings*. 2019, pp 707-711.
7. **AL-QASSEM, A.,** GAGARA, L., FEDOROV, V., LUNGU, I., POTLOG, T. The intermediate CdO layer influence on solar energy conversion in CdS/CdTe heterojunctions. In: *Integrare prin cercetare și inovare*. SNE. 2020 Chișinău. Republica Moldova 2020, pp 290-293. ISBN 978-9975-152-50-1
8. **AL-QASSEM, AMJAD**, SPALATU, N., FEDOROV, V., GAGARA, L., JOSEPSON, R., POTLOG,T. Sputtered CdO nanolayer as an interface engineering approach to CdTe solar cells. EMRS: 2022 Spring Meeting. https://www.european-mrs.com/thin-film-chalcogenide-photovoltaic-materials-emrs-2

ADNOTARE

AL QASSEM Amjad „Studiul proceselor fizice în heterostructurile fotosensibile bazate pe straturi subțiri de CdTe". Teză pentru obținerea titlului de Doctor în Științe Fizice. Chișinău, Republica Moldova, 2025.

Structura tezei.: teza include o introducere, 5 capitole, concluzii generale și recomandări, o bibliografie cu 171 de titluri, 132 de pagini, 68 de figuri, 13 tabele și 65 de formule. Rezultatele sunt publicate în 8 publicații științifice.

Cuvinte cheie: sulfură de cadmiu CdS, telurură de cadmiu CdTe, heterojoncțiune HJ, celulă solară SC, volum cvasi-închis CSS, oxid de cadmiu CdO.

Scopul tezei: dezvoltarea tehnologiei de producție și studiul celulelor solare cu straturi subțiri bazate pe heterojoncțiunea CdS/CdTe (HJ) cu un strat dielectric CdO de grosime nanometrică. Pe baza studiilor măsurătorilor electrice și fotoelectrice, determinarea condițiilor tehnologice optime pentru producerea HJ din straturi subțiri de CdS/CdO/CdTe prin metoda CSS.

Obiectivele cercetării: studierea caracteristicilor epitaxiei prin metoda CSS a compușilor semiconductori A_2B_6 și dezvoltarea metodelor pentru optimizarea modurilor de obținere a straturilor subțiri de CdS și CdTe; dezvoltarea unei tehnologii pentru crearea unui nanostrat izolator de CdO la interfața CdS/CdTe; studierea proprietăților electrice ale HJ CdS/CdTe și CdS/CdO/CdTe utilizând o abordare cuprinzătoare care include analiza caracteristicilor C-V, I-V și spectroscopia de admitanță la diferite temperaturi și frecvențe alternative ale semnalului; studierea efectului nanostratului izolator de CdO asupra parametrilor fotoelectrici ai celulelor solare CdS/CdTe.

Noutatea și originalitatea științifică a lucrării constă în studiul sistematic al influenței stratului nanometric de CdO asupra parametrilor fotoelectrici, profilurilor de concentrație a purtătorilor de sarcină și energiei de ionizare a nivelurilor de impurități utilizând metodele C-V, I-V și spectroscopia de admitanță a HJ obținute.

Problema științifică importantă rezolvată este că, pentru prima dată, a fost efectuată o gamă largă de studii electrice ale HJ CdS/CdTe și s-a demonstrat că una dintre metodele de creștere a concentrației de goluri libere pentru ionizarea defectelor (creșterea concentrației de defecte acceptoare intrinseci ale locurilor vacante de cadmiu, V_{Cd}) este introducerea unui nanostrat izolator de CdO la interfața fotoconvertoarelor CdS/CdTe HJ. Introducerea unui nanostrat izolator de CdO, cu grosimea de 8-10 nm, prin pulverizare magnetronică între straturile frontale de CdS și CdTe absorbite crește curentul de scurtcircuit de la 15,7 mA/cm2 la 26,5 mA/cm2 și tensiunea de circuit deschis de la 0,66 V la 0,77 V, crescând eficiența de la 3,8% la 8,9%.

Semnificația teoretică a lucrării constă în stabilirea mecanismului de curgere a curentului în HJ CdS/CdTe controlat de două tipuri de niveluri de impuritate (~ 0,45 eV și ~ 0,27 eV), iar în HJ CdS/CdO/CdTe de un nivel (~ 0,25 eV).

Semnificația aplicativă a lucrării. Au fost dezvoltate condițiile optime (temperaturile substratului, de tratare termică și a evaporatorului) pentru obținerea de straturi CdS și CdTe cu compoziție stoichiometrică și o calitate ridicată a structurii policristaline, precum și un nanostrat izolator de CdO prin pulverizare magnetronică pentru obținerea de straturi subțiri SC cu caracteristici funcționale îmbunătățite.

Implementarea rezultatelor științifice. Tehnologia dezvoltată poate fi aplicată cu succes pentru a crea SC cu straturi subțiri semiconductoare fotosensibile. Astfel de SC, create pe substraturi flexibile, își pot găsi aplicații în dispozitivele electronice cu dimensiuni reduse cu alimentare autonomă (puncte de sistem automat de comunicații, sisteme de observare meteorologică, sisteme de monitorizare și control al traficului rutier, semne de navigație și semnalizare etc.).

АННОТАЦИЯ

АЛЬ КАССЕМ Амджад „Исследование физических процессов в фоточувствительных гетероструктурах на основе тонких слоев CdTe". Диссертация на соискание ученой степени Доктора Физических Наук, Кишинев, Республика Молдова, 2025 год.

Структура диссертации: диссертация включает введение, 5 глав, общие выводы и рекомендации, библиографию из 171 наименований, 132 страниц, 68 рисунков, 13 таблиц и 65 формул. Результаты опубликованы в 8 научных публикациях.

Ключевые слова: сульфид кадмия CdS, теллурид кадмия CdTe, гетеропереход ГП, солнечный элемент СЭ, квазизамкнутый объем CSS, оксид кадмия CdO.

Цель работы: разработка методики получения и исследование тонкопленочных СЭ на основе гетероперехода (ГП) CdS/CdTe с диэлектрическим слоем CdO, нанометрической толщины. На основании исследований электрических и фотоэлектрических измерений, определить оптимальные технологические условия для изготовления тонкопленочной гетероструктуры CdS/CdO/CdTe методом квазизамкнутого объёма.

Задачи исследования: изучить особенности эпитаксии методом CSS полупроводниковых соединений группы A_2B_6 и разработать способы оптимизации режимов получения тонких пленок CdS, CdTe; разработать технологию создания изолирующего нанослоя CdO на границе разделаCdS/CdTe; исследовать электрические свойства ГП CdS/CdTe и CdS/CdO/CdTe, используя комплексный подход, включающий анализ ВФХ, ВАХ и адмиттанс-спектроскопию при различных температурах и частотах переменного сигнала; изучить влиянии изолирующего нанослоя CdO на фотоэлектрические параметры СЭ CdS/CdTe.

Научная новизна и оригинальность работы состоит в систематическом исследовании влияния нанометрического слоя CdO на фотоэлектрические параметры, профили концентрации носителей заряда и энергии ионизации примесных уровней полученных гетероструктур методами ВФХ, ВАХ и адмиттансной спектроскопии.

Решенная важная научная проблема заключается в том, что впервые проведен широкий комплекс электрических исследований ГП CdS/CdTe и продемонстрировано, что одним из методов увеличения концентрации свободных дырок для ионизации дефектов (увеличения концентрации собственных акцепторных дефектов вакансии кадмия, V_{Cd}), является внедрение изолирующего нанослоя CdO на границе раздела CdS/CdTe ГП фотопреобразователей. Внедрение изолирующего нанослоя CdO, толщиной 8-10 нм, методом магнетронного распыления между фронтальным CdS и поглощаемым CdTe слоями повышает ток короткого замыкания с 15,7 мА/см^2 до 26,5 мА/см^2 и напряжение холостого хода с 0,66 В до 0,77 В, увеличивая коэффициент полезного действия с 3,8 % до 8,9 %.

Теоретическая значимость работы состоит в установлении механизма токопрохождения в ГП CdS/CdTe, контролируемого двумя типами примесных уровней (~ 0.45 эВ и ~ 0.27 эВ), а в ГП CdS/CdO/CdTe одним уровнем (~ 0.25 эВ).

Прикладная значимость работы. Разработаны оптимальные режимы (температуры подложки, термоотжига и испарителя) получения пленок CdS и CdTe стехиометрического состава с высоким качеством кристаллической структуры, и технологический режим для получения, изолирующего нанослоя CdO методом магнетронного распыления для получения тонкопленочных СЭ с улучшенными функциональными характеристиками.

Внедрение научных результатов. Разработанная технология может быть успешно применена для создания фоточувствительных полупроводниковых тонкопленочных СЭ. Такие СЭ, созданные на гибких подложках могут найти свое применение для работы небольших электронных устройств с автономным питанием (автоматические пункты системы связи, системы метеонаблюдений, системы наблюдения и контроля движения на автострадах, навигационные и сигнальные знаки и т.д.).

SUMMARY

AL QASSEM Amjad "Study of physical processes in photosensitive heterostructures based on thin CdTe layers". Thesis for the degree of Doctor of Physics Sciences. Chisinau, Republic of Moldova, 2025.

Thesis contents: the thesis includes an introduction, 5 chapters, general conclusions and recommendations, a bibliography of 171 titles, 132 pages, 68 figures, 13 tables and 65 formulas. The results are published in 8 scientific publications.

Keywords: cadmium sulfide CdS, cadmium telluride CdTe, heterojunction GP, solar cell SC, quasi-closed volume CSS, cadmium oxide CdO.

The goal of the thesis: development of the production technology and study of thin film solar cells based on the CdS/CdTe heterojunction (HJ) with a CdO dielectric layer of nanometric thickness. Based on the studies of electrical and photoelectric measurements, determine the optimal technological conditions for the production of a thin film CdS/CdO/CdTe HJ by the CSS method.

Research objectives: to study the features of epitaxy by CSS method of A_2B_6 semiconductor compounds and to develop methods for optimizing the modes of obtaining CdS and CdTe thin films; to develop a technology for creating an insulating CdO nanolayer at the CdS/CdTe interface; to study the electrical properties of CdS/CdTe and CdS/CdO/CdTe heterojunctions using a comprehensive approach that includes analysis of the C-V characteristics, I-V characteristics, and admittance spectroscopy at different temperatures and alternating signal frequencies; to study the effect of the insulating CdO nanolayer on the photoelectric parameters of CdS/CdTe solar cells.

The scientific novelty and originality of the work consists in the systematic study of the influence of the nanometric CdO layer on the photoelectric parameters, charge carrier concentration profiles and ionization energy of impurity levels using the methods of C-V, I-V and admittance spectroscopy of the obtained HJ.

The solved important scientific problem is that for the first time a wide range of electrical studies of CdS/CdTe HJ was carried out and it was demonstrated that one of the methods for increasing the concentration of free holes for ionization of defects (increasing the concentration of intrinsic acceptor defects of cadmium vacancies, V_{Cd}) is the introduction of an insulating CdO nanolayer at the interface of CdS/CdTe HJ photoconverters. The introduction of an insulating CdO nanolayer, 8-10 nm thick, by magnetron sputtering between the front CdS and absorbed CdTe layers increases the short-circuit current from 15.7 mA/cm2 to 26.5 mA/cm2 and the open-circuit voltage from 0.66 V to 0.77 V, increasing the efficiency from 3.8% to 8.9%.

The theoretical significance of the work consists in establishing the mechanism of current flow in the CdS/CdTe GP controlled by two types of impurity levels (~ 0.45 eV and ~ 0.27 eV), and in the CdS/CdO/CdTe GP by one level (~ 0.25 eV).

Applicative significance of the work. Optimal modes (temperatures of the substrate, thermal annealing and evaporator) for obtaining CdS and CdTe films of stoichiometric composition with a high quality of the crystalline structure, and an insulating CdO nanolayer by magnetron sputtering for obtaining thin film SC with improved functional characteristics have been developed.

Implementation of scientific results. The developed technology can be successfully applied to create photosensitive semiconductor thinfilm SC. Such SC, created on flexible substrates, can find their application for the operation of small electronic devices with autonomous power supply (automatic communication system points, meteorological observation systems, highway traffic monitoring and control systems, navigation and signal signs, etc.).

АЛЬ-КАССЕМ АМДЖАД

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ СЛОЕВ CdTe

134.01- ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

доктора физических наук

Подп.в печать: 19.10.2015	Формат бумаги: 60x84 1/16.
Бумага офсет. Печать офсет.	Тираж: 10 ex.
Печ.л.:1,7	Заказ №.

Отпечатано в типографии Centrul Editorial-Poligrafic al USM
Str. A. Mateevici 60, Chişinău, MD-2009, Moldova

UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA

Cu titlu de manuscris

C.Z.U. 537.311.322:539.21 (043.3)

AL QASSEM AMJAD

STUDIUL PROCESELOR FIZICE ÎN HETEROSTRUCTURILE FOTOSENSIBILE PE BAZĂ PE FILME SUBȚIRI CdTe

134.01 FIZICA ȘI TEHNOLOGIA MATERIALELOR

Autoreferatul

Teză de doctor în științe fizice

CHIȘINĂU, 2025