Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 535.215.5; 535.337; 621.383.46

МАЛЮТИНА-БРОНСКАЯ
Виктория Владимировна

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ОКСИДА ЦИНКА, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника,
приборы на квантовых эффектах

Минск 2026

Научная работа выполнена в государственном научно-производственном объединении «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника».

Научные руководители	**Залесский Валерий Борисович**, кандидат технических наук
	Семченко Алина Валентиновна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры радиофизики и электроники факультета физики и информационных технологий учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»
Официальные оппоненты:	**Чубенко Евгений Борисович**, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории 4.3 «Материалы и структуры наноэлектроники» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
	Тиванов Михаил Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, декан физического факультета Белорусского государственного университета
Оппонирующая организация	Государственное научно-практическое объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Защита состоится «12» марта 2026 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. +375-17-293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «9» февраля 2026 года.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент Г.А. Пискун

ВВЕДЕНИЕ

Оксид цинка (ZnO) благодаря комплексу оптических, электрических и пьезоэлектрических свойств имеет широкие перспективы использования в фотонных кристаллах, фотодиодах, защитных и токосъемных слоях недорогих солнечных элементов (СЭ) большой площади и других устройствах оптоэлектроники. Вместе с тем ZnO в отличие от классических полупроводников, таких как кремний, обладает рядом специфических особенностей: наличием трудно контролируемых точечных дефектов кристаллической структуры различного характера, остаточных примесей и макроскопических дефектов (дислокации, границы блоков двойникования и т. п.). Свойства легированных тонких пленок ZnO определяются различными пространственно-энергетическими неоднородностями, такими, как сложные профили распределения легирующей примеси, локализованные состояния на границах раздела, а также в самих пленках, обусловленные концентрацией и составом легирующей примеси, методами получения структур, последующими физико-химическими и термическими обработками. Изучение влияния точечных дефектов и легирующих добавок на оптические и электрические свойства пленок и структур на основе ZnO является актуальной задачей, имеющей решающее значение для практического применения этого материала.

Диссертация посвящена исследованию оптических и фотоэлектрических характеристик структур «металл – легированный оксид цинка – кремний», полученных методом магнетронного распыления, комбинацией методов электрохимического осаждения ионов примеси и магнетронного распыления, а также золь-гель методом, для применения тонких пленок на основе ZnO в твердотельных устройствах оптоэлектроники.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами) и темами

Работы, проведенные в рамках диссертации, соответствуют: п.4. «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы» приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021 – 2025 годы (утверждено Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156); п.2. «Инновационные технологии в промышленности: фотоника, микроэлектроника, сенсорика и СВЧ-технологи» перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2026 – 2030 годы (утверждено Указом Президента Республики Беларусь от 01.04.2025 № 135).

Работа выполнялась в рамках следующих проектов: задание индивидуального гранта «Исследование методов формирования, электрических и фотоэлектрических характеристик полупроводниковых структур кремний – диэлектрик с встроенными наночастицами» (2006–2007 гг., № ГР 20063792); ГКПНИ «Энергобезопасность» задание 21 «Разработка методов получения высокоэффективных тонкопленочных фотопреобразователей на основе прямозонных полупроводников $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$» (2006–2010 гг., № ГР 2008516); ГПНИ «Электроника» задание 1.07 «Разработка и исследование конструктивных и технологических методов создания новых видов приборов опто- и микроэлектроники на основе тонких пленок нано- и микроструктурированных полупроводниковых материалов и кремния» (2006–2010 гг., № ГР 20064754); ГПНИ «Электроника и фотоника» задание 1.2.08 «Разработка и исследование твердотельных фотоумножителей и фотовольтаических систем на основе тонкопленочных полупроводниковых структур для фотоэнергетики, медицинской и измерительной техники (2010–2015 гг., № ГР 20141965), подпрограмма «Уникальное научное оборудование» ГНТП «Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных исследований» (ГНТП «Эталоны и научные приборы»), 2016–2020 гг., № ГР 20190890).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является установление взаимосвязи оптических и фотоэлектрических характеристик структур «металл – легированный оксид цинка – кремний», полученных методами магнетронного распыления, комбинацией методов электрохимического осаждения ионов примеси и магнетронного распыления, а также золь-гель методом, с легирующими примесями для применения в оптоэлектронных устройствах.

В соответствии с поставленной целью решались следующие *задачи*:

1. Определить морфологию поверхности исследуемых структур «легированный оксид цинка – кремний» и «легированный оксид цинка – стекло» с применением высокоразрешающих методов контроля (сканирующая и просвечивающая электронная микроскопии) в зависимости от режимов синтеза.

2. Определить оптические характеристики структур «металл – легированный оксид цинка – кремний» и установить взаимосвязь оптических свойств сформированных структур с режимами их формирования.

3. Установить зависимости электрофизических характеристик

структур «металл – легированный оксид цинка – кремний» от режимов их формирования для выявления механизма протекания тока.

4. Определить фотоэлектрические характеристики структур «металл – легированный оксид цинка – кремний» для установления взаимосвязи фотоэлектрических свойств сформированных структур с режимами их формирования.

5. Исследовать кремниевые солнечные элементы совместно со структурами «легированный оксид цинка – стекло» для установления возможности повышения эффективности преобразования излучения солнечным элементом.

Объект исследования – твердотельные структуры «легированный оксид цинка – стекло», «легированный оксид цинка – кремний», «металл – легированный оксид цинка - кремний».

Предмет исследования – электрофизические, оптические и фотоэлектрические свойства структур «легированный оксид цинка – стекло», «металл – легированный оксид цинка – кремний».

Научная новизна

1. Модели вольт-фарадных характеристик на основе метода Термана, с учетом дискретных поверхностных состояний структур ZnO:Er^{3+}/*n*-Si позволили установить наличие на гетероинтерфейсе дискретного акцепторного уровня с глубиной залегания E_{t1} = 0,01 эВ и концентрацией N_{t1}= 3,2·10^{12} $см^{-2}$, не обусловленного собственными дефектами ZnO.

2. Методом пространственно-разрешенного фототока установлено, что структуры ZnO:Er^{3+}/Si и ZnO:Tb^{3+}/Si при облучении ИК-лазером с длиной волны излучения λ = 0,98 мкм, P = 100 мВт (5,1·10^{-3} $Вт/см^2$) обладают фоточувствительностью по всей поверхности структуры со значением фототока от 0,5 до 0,7 мкА и от 1,0 до 1,6 мкА соответственно.

3. Установлено, что отжиг выше 900 ºС пленок ZnO:Tb^{3+}, полученных комбинацией электрохимического осаждения ионов Tb^{3+} и магнетронного распыления ZnO, приводит к появлению трех хорошо разрешенных полос ФЛ: 1,93 эВ (λ = 640 нм), 2,27 эВ (λ = 544 нм) и 2,56 эВ (λ = 482 нм), с доминирующей полосой 2,27 эВ (λ = 544 нм) при возбуждении излучением с длиной волны λ = 368 нм, обусловленных диффузией и встраиванием ионов Tb^{3+} в кристаллическую матрицу ZnO. Отжиг при 1000 ºС приводит к исчезновению низкоэнергетической полосы и в спектрах ФЛ, наблюдается только одна интенсивная широкая полоса в области 2,34 эВ (λ = 527 нм).

4. Установлено, что структура Al-Ni/n-ZnO:Tb^{3+}/*n*-Si, полученная комбинацией электрохимического осаждения ионов Tb^{3+} и магнетронного распыления ZnO без высокотемпературного отжига, обладает

фоточувствительностью от 0,42 до 1,25 А/Вт во всей рабочей области спектра от 405 до 1000 нм при напряжении смещения +15 В, что значительно выше чем у кремниевого фотодиода.

5. Структуры «ZnO:Er:Al/стекло», полученные золь-гель методом, обладают коэффициентом пропускания от 70 до 80 % в спектральном диапазоне 370 – 1000 нм и интенсивной фотолюминесценцией, что позволяет использовать их в качестве конвертеров кремниевых солнечных элементов и повысить КПД на 1,46 % по сравнению с «ZnO:Al/стекло».

Положения, выносимые на защиту

1. Модели высокочастотных вольт-фарадных характеристик на основе метода Термана, с учетом дискретных поверхностных состояний структур «металл – окисел – полупроводник» ($ZnO:Er^{3+}/Si$, $ZnO:Tb^{3+}/Si$, $ZnO:Er^{3+}:Al/Si$) позволившие объяснить и экспериментально подтвердить наличие максимума в области модуляции емкостной характеристики высотой от 3 до 16 пФ, значение которого увеличивается под действием излучения видимого диапазона длин волн на 1–10 пФ, обусловленного дискретными поверхностными состояниями гетероинтерфейса с концентрацией 10^{11} – 10^{12} $см^{-2}$.

2. Механизм протекания тока при комнатной температуре структур $ZnO:RE^{3+}/Si$, $ZnO:Al:RE^{3+}/Si$ ($RE^{3+}= Er^{3+}$, Eu^{3+}, Tb^{3+}) с плотноупакованной поликристаллической структурой оксида (с размером зерен от 0,1 до 0,4 мкм), установленный на основе экспериментальных вольт-амперных характеристик при напряжениях смещения более ±0,7–12 В, как ток, ограниченный пространственным зарядом при наличии дискретных ловушечных уровней.

3. Механизм фотолюминесценции слоев $ZnO:RE^{3+}$, $ZnO:Al:RE^{3+}$ и $ZnO:Ag:RE^{3+}$ ($RE^{3+}= Er^{3+}$, Eu^{3+}, Tb^{3+}), обусловленный как излучением примесных редкоземельных ионов, так и межзонными переходами ZnO (λ = 390 нм), а также оптическими переходами на дефектах RE^{3+}-O (λ = 510 – 800 нм), концентрация которых увеличивается с возрастанием температуры отжига свыше 400 ºС с образованием в запрещенной зоне подзоны примесных состояний с мелкими энергетическими уровнями (~0,01 эВ).

4. Экспериментально установленные зависимости фоточувствительности твердотельных структур $Al-Ni/ZnO:Re^{3+}/Si$ (Re^{3+}: Er^{3+} и Tb^{3+}) от температуры отжига и напряжения смещения: легирование Er^{3+} с отжигом 600 ºС позволяет достигнуть-фоточувствительности 0,1–0,45 мА/Вт в диапазоне длин волн от 600 до 950 нм при напряжении смещения 0 В; легирование Tb^{3+} без отжига 0,3–1,0 А/Вт в диапазоне длин волн от 400 до 1000 нм при напряжении смещения более +10 В.

Личный вклад соискателя ученой степени

Представленные в работе теоретические и экспериментальные результаты, адаптация экспериментальных методов для решения поставленных задач, математическая обработка результатов проведены лично соискателем. Формулировка положений, выносимых на защиту сделаны соискателем по итогам обсуждений результатов с научными руководителями. Методология работы по измерению и анализу фотоэлектрических характеристик обсуждалась с к.т.н. Залесским В.Б. Анализ и интерпретация полученных данных и выводы по диссертационной работе сделаны соискателем по итогам обсуждений с научными руководителями и соавторами. Результаты по измерению фотолюминесценции получены и их обсуждение проведено совместно с к.ф.-м.н. А. В. Мудрым и к.ф.-м.н. Е. В. Луценко. Результаты по микроскопии получены и их обсуждение проведено совместно с Д. В. Жигулиным. Следующие соавторы предоставили образцы и начальные сведения о них: д.ф.-м.н. А. В. Семченко, Т. Р. Леонова, А. М. Поликанин; к.т.н. В. В. Сидский. Соавторы работ: д.т.н, чл.-корр. НАН Беларуси В. А. Пилипенко; д.х.н, чл.-корр. НАН Беларуси А. В. Рогачев; д.ф.м.н. В. Ф. Гременок; д.х.н В. Е. Федоров; д.ф.-м.н С. А. Хахомов; д.ф.- м.н. Ш. У. Юлдашев, д.т.н. В. А. Солодуха; Ph.D. A. M. Saad; D.Sc. W. Strek; к.ф.-м.н. В. Е. Гайшун; к.ф.-м.н. А. В. Петров; к.ф.-м.н. Е. П. Зарецкая; к.т.н. Н. С. Ковальчук; к.ф.-м.н. А. Н. Петлицкий; к.ф.- м.н. Д. Л. Коваленко; к.ф.-м.н. Л. А. Ахоян; к.т.н. Г. Е. Айвазян; А. В. Агабекян; К. Д. Данильченко; И. Ю. Осипова; д.т.н. М. А. Ярмоленко; С. А. Сорока; д.ф.-м.н. Э. В. Русу; В. В. Васькевич; А. А. Маевский; Ph.D. В. Верлан; А. Ф. Перец; А. В. Котиков; А. В. Данильчик; О. А. Гребенщиков принимали участие в изготовлении образцов и обсуждении промежуточных результатов. Результаты, полученные соавторами публикаций, в диссертацию не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 20 симпозиумах, конференциях и семинарах, в том числе на 18 международных. Некоторые из них: VII международная конференция «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии» (Кисловодск, Россия, 2007); 8-я международная школа-семинар «International Siberian Workshop and Tutorials (EDM – 2007)» (Эрлагол, Россия, 2007); Международные научные конференции «Актуальные проблемы физики твёрдого тела» (Минск, Беларусь, 2007, 2011, 2016); International Conference «Next Generation Solar Energy, From Fundamentals to Applications» (Эрланген,

Германия, 2011); IV Международная научная конференция «Наноструктурные материалы-2014: Беларусь – Россия – Украина» (Минск, Беларусь, 2014); Российская конференция по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника – 2015» (Новосибирск, Россия, 2015); Международная научно-техническая конференция «Опто-, микро- и СВЧ-электроника – 2018» (Минск, Беларусь, 2018); 25-я Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, Россия, 2018); International Conference on Rare Earth Materials (Вроцлав, Польша, 2018), 17- я, 19-я Международная конференция о глобальных исследованиях и образовании, Inter-Academia (Каунас, Литва, 2018; Гомель, Беларусь, 2021).

Использование результатов диссертации подтверждено актами их внедрения в учебный процесс и использования для практического применения.

Опубликованность результатов диссертации

По результатам диссертационной работы опубликовано 34 печатных работы. В их числе 14 статей в научных рецензируемых журналах, объемом 6,33 авторского листа, 11 статей в сборниках трудов научных конференций объёмом 2,85 авторского листа. Объем опубликованного материала в 9 тезисах докладов соответствует 0,42 авторского листа. Общий объем по теме диссертации, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий, составляет 9,6 авторского листа.

Структура и объем диссертации

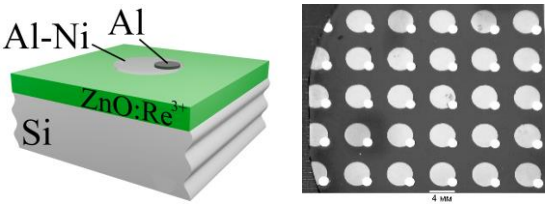
Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав основной части, заключения, библиографического списка и 5 приложений. Диссертация изложена на 171 странице, включая 78 рисунков на 41 странице, 12 таблиц на 5 страницах и 5 приложений на 22 страницах. Список использованных источников приведен на 16 страницах и включает 174 наименования использованных источников и 34 наименования публикаций соискателя ученой степени.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** проведен аналитический обзор литературы по методам синтеза и исследования тонких пленок ZnO и гетеросистем на их основе, а также анализа влияния собственных и примесных дефектов на оптические и фотоэлектрические свойства оксида цинка. Проанализированы возможности использования тонких пленок ZnO и гетеросистем на их основе для

практического применения в оптоэлектронных устройствах, отмечаются нерешенные задачи в данной области.

Во **второй главе** рассмотрены методы получения (метод магнетронного распыления на установке УРМ3.279.029 (производство СССР), на основе комбинации электрохимического осаждения ионов примеси Tb^{3+} и метода магнетронного распыления ZnO и золь-гель метод) и исследования структур «легированный оксид цинка – стекло», «легированный оксид цинка – кремний», «металл – легированный оксид цинка – кремний».



а *б*

Рисунок 1 – Схематичное изображение (а) и внешний вид фотодиодных структур Al-Ni/ZnO:RE^{3+}/Si (б)

Для исследования фотоэлектрических характеристик были сформированы фотодиодные структуры Al-Ni/ZnO:RE^{3+}/Si, структурная схема и внешний вид которых показана на рисунке 1, а. Для формирования верхнего электрода фотодиодных структур производилось напыление Ni-Al контактных площадок на установке ВУ-2 методом термического напыления. Морфология тонких пленок оксида цинка анализировалась с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (JEOL 6400, США), а для пленок, полученных золь-гель методом, дополнительно использовалась атомно-силовая микроскопия (АСМ) (SOLVER Pro 47-PRO, Россия). Измерялись спектры пропускания и отражения структуры «легированный оксид цинка - стекло» в диапазоне длин волн от 300 до 1200 нм (спектрофотометры PV 1251C и Photon RT, Беларусь). Спектры фотолюминесценции (ФЛ) и спектры возбуждения люминесценции (СВЛ) регистрировались при комнатной температуре. Для определения электрофизических и фотоэлектрических характеристик структур ZnO:RE^{3+}/Si измерялись вольт-фарадные характеристики (ВФХ) (измеритель иммитенса Е7-20, Беларусь) и вольт-амперные характеристики (ВАХ) (Keithley 2450, Китай) в темноте и при воздействии источников излучения видимого и ИК спектрального диапазона (автоматизированный базовый лазерный испытательный комплекс, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», свидетельство метрологической аттестации БелГИМ № 69-50 от 30.09.2020). Для оценки приповерхностных слоев фотоприемников использовался метод *LBIC* – метод пространственно-разрешенного фототока, индуцированного лазерным лучом. Для оценки параметров кремниевых СЭ использовался имитатор солнечного излучения со спектром АМ 1,5.

В **третьей главе** установлены морфологические свойства пленок *i*-ZnO, ZnO:Er^{3+}, ZnO:Eu^{3+} на стеклянных и кремниевых подложках (КДБ-1 и

КЭФ-0,5), полученных методом магнетронного распыления на постоянном токе, в зависимости от температуры отжига. Определены оптические свойства этих пленок, а также фотоэлектрические свойства структур Al-Ni/ZnO:Eu^{3+}/Si и Al-Ni/ZnO:Er/Si.

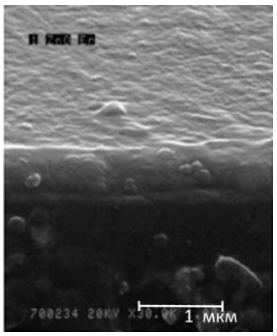


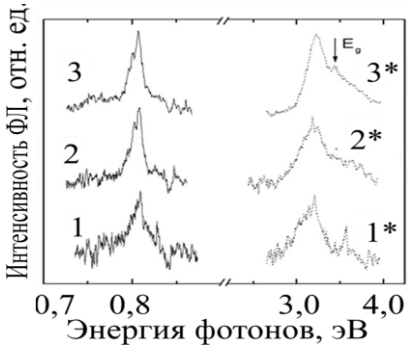
Рисунок 2 — СЭМ-изображение поперечного сечения тонких пленок ZnO:Er^{3+} на подложке КДБ-1, полученных магнетронным распылением

Установлено, что пленки ZnO:Er^{3+} и ZnO:Eu^{3+}, толщиной порядка 300 мкм представляют собой плотноупакованные структуры с практически гладкой поверхностью и размерами зерен от 0,1 до 0,15 мкм и от 0,1 до 0,3 мкм соответственно (рисунок 2). Для пленок ZnO:Er^{3+} и ZnO:Eu^{3+}, сформированных на стеклянных подложках, характерен более крупный размер зерен и меньшая однородность и адгезия слоев. Установлено, что спектры пропускания пленок ZnO:Er^{3+} и ZnO:Eu^{3+} на стеклянных подложках обладают значением пропускания от 70 до 80 % в широком спектральном диапазоне от 370 до 2500 нм.

В излучении пленок легированного ZnO наблюдается интенсивная фотолюминесценция, связанная с собственными точечными дефектами «ZnO – вакансия кислорода» и междоузельный кислород. В случае образца ZnO:Er^{3+} (отжиг до 900 °С) наблюдается ФЛ в области 1,54 мкм, связанная с ионами Er^{3+}, встроенными в матрицу ZnO (рисунок 3). Данная ФЛ обусловлена оптическими переходами на дефектах Er-O, образующих в запрещенной зоне подзону примесных состояний с мелкими энергетическими уровнями (~0,01 эВ), концентрация которых увеличивается с температурой отжига. В случае термически отожженного образца ZnO:Eu^{3+} (отжиг до 400 °С) при комнатной температуре наблюдается люминесценция, связанная с внутрицентровыми оптическими переходами ионов Eu^{3+} (рисунок 4, кривая 2).

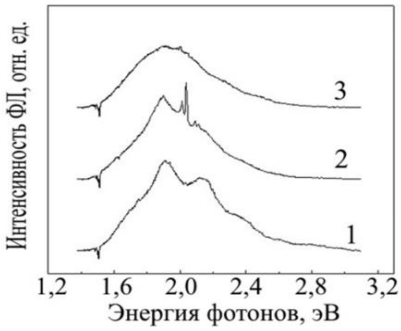
Доминирующая полоса возбуждения ФЛ (график в автореферате не приведен), наблюдающаяся в образце в независимости от факта проведения отжига, обусловлена межзонным возбуждением с передачей энергии от матрицы ZnO к Eu^{3+}. На высокочастотных ВФХ (ВЧ ВФХ) структур ZnO:Er^{3+}/*n*-Si и ZnO:Eu^{3+}/*p*-Si четко прослеживаются области обогащения (от +6 до +12 В), обеднения (от −6 до +6 В) и инверсии (> −6 В), характерные для МОП-структур, где роль диэлектрика играет пленка ZnO ($\varepsilon = 7{,}9$) (рисунок 4). Для экспериментальных ВЧ ВФХ образцов ZnO:Er^{3+}/Si и ZnO:Eu^{3+}/Si наблюдается характерная особенность в виде максимума или ступеньки в области модуляции емкости (от −6 до 0 В), обусловленной

неоднородным распределением заряженных локальных центров с относительно узким распределением по энергии или дискретных поверхностных состояний (ПС).



1, 1* – 600 °C; 2, 2* – 750 °C; 3, 3* – 900 °C

Рисунок 3 – Спектры ФЛ (1, 2, 3) и СВЛ (1*, 2*, 3*) пленок ZnO:Er^{3+} на подложке кремния КДБ-1 для различных температур отжига



1 – 25; 2 – 400 °C; 3 – 600 °C

Рисунок 4 – Спектры ФЛ пленок ZnO:Eu^{3+}, выращенных на стеклянных подложках и отожженных при различных температурах

Установлено, что при освещении значение емкости данного максимума на ВЧ ВФХ увеличивается (рисунок 5, кривые 2 и 4).

При анализе ВАХ структур ZnO:Er^{3+}/*n*-Si и ZnO:Eu^{3+}/*p*-Si, измеренных в темноте и при освещении лампой накаливания, установлено, что доминирующим механизмом протекания тока являются ток, ограниченный пространственным зарядом (ТОПЗ) при наличии дискретных уровней с узким распределением по энергии, поскольку ВАХ линеаризуются в двойных логарифмических координатах зависимостью типа $I \sim U^n$, с $n > 2$ (рисунок 6).

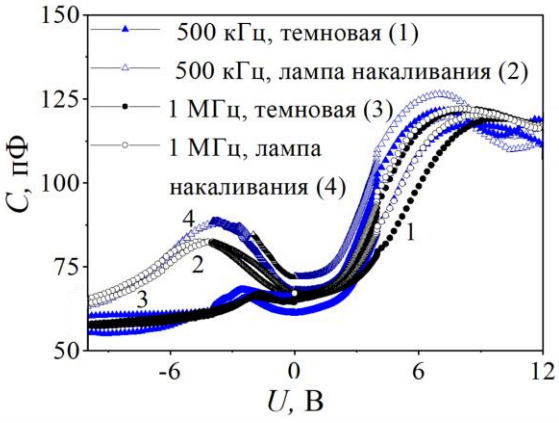


Рисунок 5 – Вольт-фарадные характеристики структуры ZnO:Er^{3+}/*n*-Si, отожженной при отжиге 900 °C

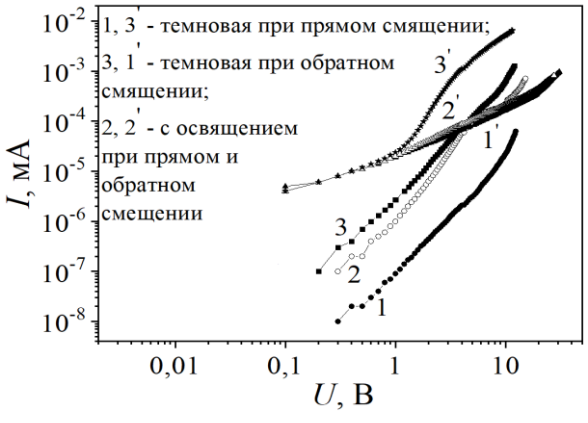
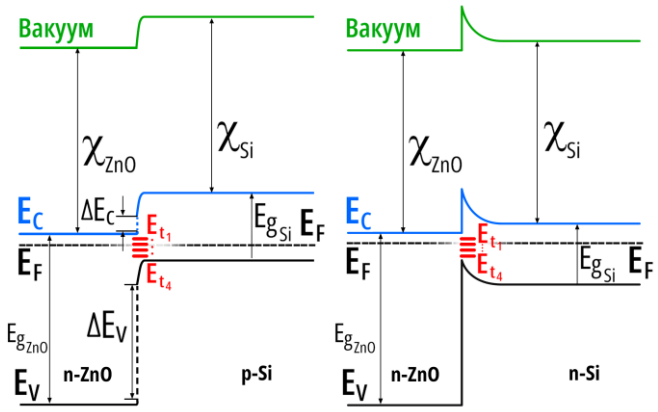


Рисунок 6 – Вольт-амперные характеристики в двойных логарифмических координатах структур ZnO:Eu^{3+}/*p*-Si отожженной и T = 400 °C (1, 2, 3) и ZnO:Er^{3+}/*n*-Si отожженной при T = 900 °C (1', 2', 3')

Для структуры ZnO:Eu^{3+}/Si на темновой ВАХ в области напряжений от +18 до +30 В n = 2,2, а для освещенной ВАХ при напряжениях от +1 до +3 В n = 3,3.Было проведено моделирование зависимости емкости от напряжения структур ZnO/Si, зонная диаграмма которых показана на рисунке 7. В основе моделирования лежит методика расчета плотности ПС МОП-структур методом Термана. Входными данными для моделирования являются: концентрация носителей примеси в подложке Si, толщина окисла (300 мкм), диэлектрическая постоянная окисла (ε = 7,9), квазинепрерывный спектр ПС по энергии как акцепторного, так и донорного типов, до четырех дискретных ПС (акцепторный или донорный типа) с разным уровнем по энергии залегания в запрещенной зоне (E_t) и концентрацией (N_t).

При моделировании ВЧ ВФХ структуры ZnO:Eu^{3+}/p-Si учитывалось три дискретных уровня ПС со следующими параметрами: E_{t1} = 0,13 эВ, $N_{t1} = 3 \cdot 10^{12}$ $см^{-2}$, акцепторный тип; E_{t2} = 0,01 эВ, $N_{t1} = 1 \cdot 10^{12}$ $см^{-2}$, акцепторный тип; E_{t3} = 0,01 эВ, $N_{t3} = 1 \cdot 10^{11}$ $см^{-2}$, донорный тип. При моделировании ВЧ ВФХ структуры ZnO:Er^{3+}/n-Si учитывался один дискретный уровень ПС со следующими параметрами: E_{t1} = 0,01 эВ, $N_{t1} = 3{,}2 \cdot 10^{12}$ $см^{-2}$, акцепторный тип и наличие акцепторных ПС с непрерывным спектром и диапазоном плотности от $3 \cdot 10^9$ до $9{,}6 \cdot 10^{11}$ $см^{-2}$, а также донорных ПС с непрерывным спектром и диапазоном концентрации от $1 \cdot 10^{10}$ до $2{,}2 \cdot 10^{12}$ $см^{-2}$.



Eg_{Si} и Eg_{ZnO} – ширина запрещенной зоны Si и ZnO, χ_{Si} и χ_{ZnO} – электронное сродство Si и ZnO, ΔE_C и ΔE_V – смещение зоны проводимости и валентной зоны, E_F – уровень Ферми

Рисунок 7 – Зонные диаграммы структур ZnO/*p*-Si (*а*) и ZnO/*n*-Si (*б*)

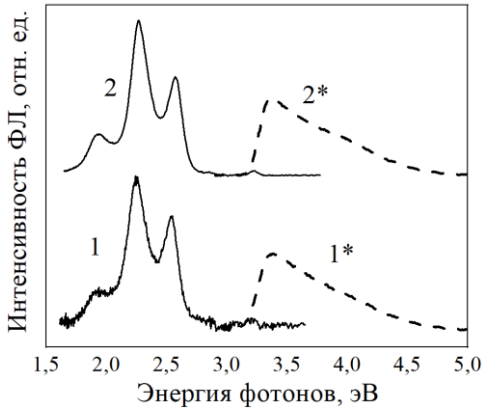
При моделировании ВЧ ВФХ было установлено, что глубина залегания дискретных ПС акцепторного типа E_{t3} = 0,01 эВ в запрещенной зоне не соответствует глубине залегания собственных дефектов (0,03—3,06 эВ) и может быть обусловлена введенной примесью – ионы Er^{3+} и Eu^{3+}.

Измерения распределения значения фототока по площади исследуемых структур показало, что практически вся поверхность исследуемых структур фоточувствительна и значение фототока варьируется в диапазоне от 0,3 до 0,7 мкА. Установлено, что плотность тока фотодиодной структуры Al-Ni/ZnO:Er^{3+}/Si составляет от 0,05 до 0,45 А/$см^2$ в диапазоне мощностей излучения от 100 до 500 Вт/$м^2$ (диапазон длин волн от 600 до 950 нм).

В **четвертой главе** установлены морфологические свойства пленок ZnO:Tb^{3+} на кремниевой подложке, полученных на основе комбинации электрохимического осаждения Tb^{3+} и метода магнетронного распыления ZnO, в зависимости от температуры отжига. Определено влияние температуры отжига и типа подложки на оптические и фотоэлектрические свойства фотодиодных структур Al-Ni/ZnO:Tb^{3+}/Si. Установлено, что неотожженные пленки ZnO:Tb^{3+} имеют поликристаллическую структуру с плотной упаковкой зерен размером от 0,1 до 0,4 мкм. Для неотоженной пленки ZnO:Tb^{3+} на стеклянной подложке установлен коэффициент пропускания от 70 до 87 % в спектральном диапазоне от 370 до 1100 нм.

Установлено, что для пленок ZnO:Tb^{3+} с возрастанием температуры отжига от 700 °С до 1000 °С наблюдается увеличение интенсивности ФЛ, обусловленной излучением ионов Tb^{3+} трех полос 1,93 эВ (λ = 640 нм), 2,27 эВ (λ = 544 нм) и 2,56 эВ (λ = 482 нм), с доминирующей полосой 2,27 эВ (λ = 544 нм) (рисунок 8). Показано, что возбуждение в полосе ассоциированных центров поглощения понижает интенсивность коротковолновой области спектра люминесценции по отношению к длинноволновой области.

Продемонстрировано, что ВЧ ВФХ структур *n*-ZnO:Tb^{3+}/Si зависят от условий освещения (лампа накаливания или ИК-источник излучения), что обусловлено наличием отрицательного заряда ловушек, вызванного собственными и примесными дефектами (рисунок 9). Установлено, что ВАХ структур ZnO:Tb^{3+}/Si (график в автореферате не приведен) линеаризуется в двойных логарифмических координатах с зависимостью $I \sim U^n$ при малых напряжениях (до +0,14 В) с n = 6,7, что свидетельствует о протекании ТОПЗ при наличии уровней ловушек.



1, 1* – 900 °С; 2, 2* – 1000 °С

Рисунок 8 – Спектры ФЛ (1,2) и СВЛ (1*, 2*) пленок ZnO:Tb^{3+} /*n*-Si для различной температуры отжига

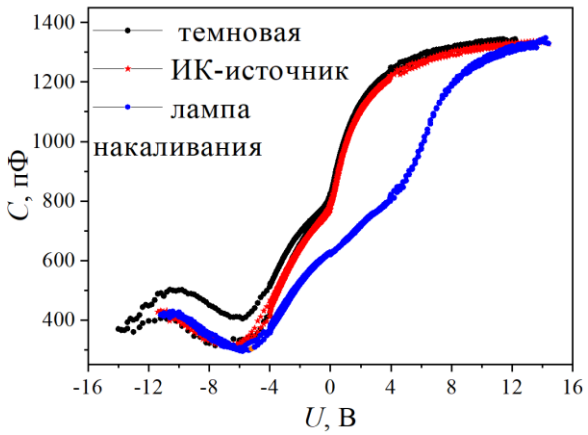


Рисунок 9 – Вольт-фарадные характеристики структуры ZnO:Tb^{3+}/*n*-Si – темновые и при освещении различными источниками света

Фотодиодная структура Al-Ni/ZnO:Tb^{3+}/*n*-Si характеризуется распределением фоточувствительности по площади в пределах от 1 до 1,6 мкА. Наибольший фотоэффект на ВАХ наблюдается на неотожженной структуре Al-Ni/ZnO:Tb^{3+}/*n*-Si после приложения напряжения смещения +1,5 В и имеет максимальную абсолютную величину при напряжении смещения +20 В (рисунок 10). На зависимости спектральной фоточувствительности от длины волны наблюдаются две полосы с максимумами фоточувствительности на длинах волн 405 нм и 780–908 нм (рисунок 9). Установлено, что максимальная спектральная чувствительность неотожженной фотодиодной структуры Al-Ni/ZnO:Tb^{3+}/*n*-Si наблюдается на длине волны 780 нм и соответствует значениям 0,43 А/Вт и 0,65 А/Вт при напряжении смещения +10 В и +15 В соответственно. При напряжении смещения +20 В максимум фоточувствительности сдвигается в длинноволновую область 800–900 нм и составляет 0,83 А/Вт (рисунок 11).

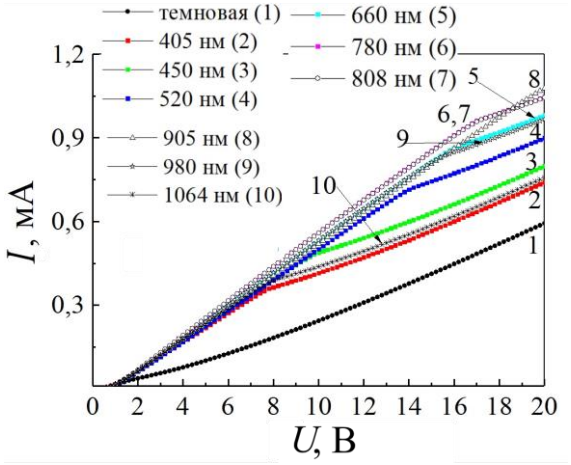
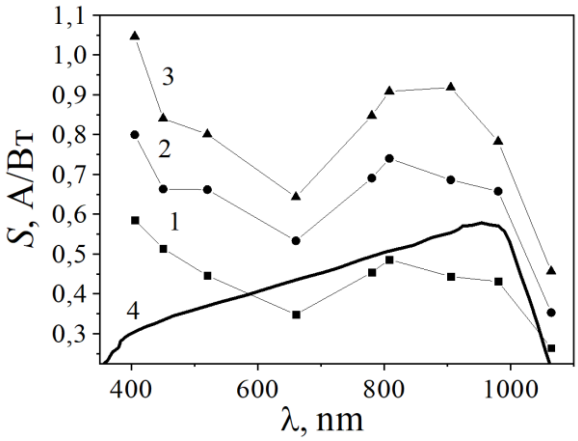


Рисунок 10– ВАХ неотожженной фотодиодной структуры Al-Ni/ZnO:Tb^{3+}/*n*-Si при освещении источниками лазерного излучения мощностью 2 мВт при положительных напряжениях смещения на контактной площадке



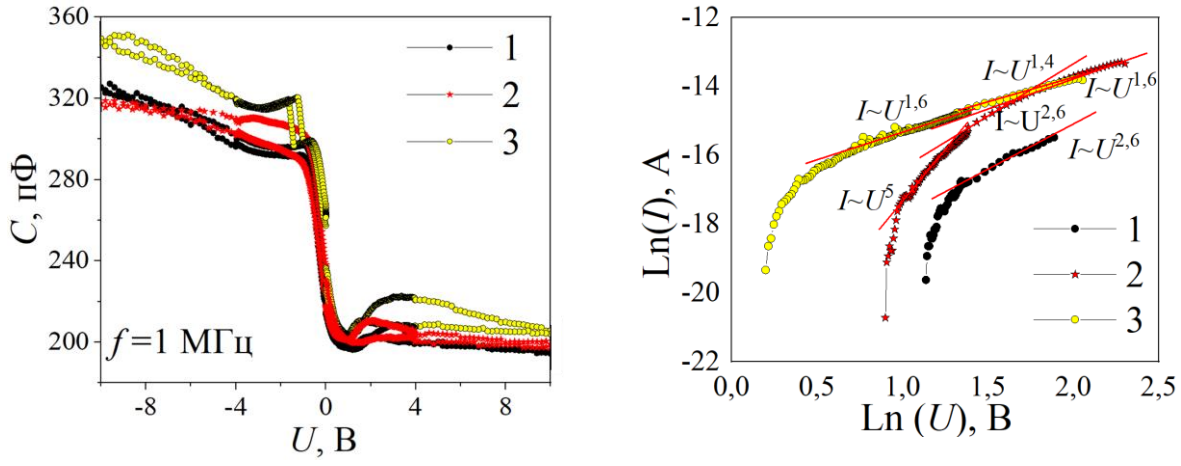
1 – 10 В; 2 – 15 В; 3 – 20 В; 4 – фотодиод Hamamatsu S3590-19

Рисунок 11 – Спектр чувствительности фотодиодной структуры Al-Ni/ZnO:Tb^{3+}/*n*-Si от напряжения смещения в линейном масштабе

В **пятой главе** установлены структурные свойства пленок ZnO с активирующими добавками редкоземельных ионов Eu^{3+}, Er^{3+}, Sm^{3+}, Tb^{3+}, Yb^{3+}, в том числе при соактивировании ионами металла *Me*: алюминия (Al) или серебра (Ag) на стеклянных и кремниевых подложках, полученных золь-гель методом. Определено влияние подложки и растворителя на структурные, оптические и фотоэлектрические свойства. По результатам СЭМ-изображений (в автореферате не приведены) установлено, что толщина получаемых пленок составляет порядка 100 нм. При использовании в качестве растворителя изопропилового спирта средний размер зерен на

поверхности ZnO:Al:RE^{3+}-плёнок составляет около 20 нм, а при использовании 2-метоксиэтанола и диметилформамида размер зерен увеличивается и составляет 52 и 25 нм соответственно. Пленки ZnO, полученные с использованием изопропилового спирта в качестве растворителя золя, обладают значением коэффициента пропускания 75 % в широком спектральном диапазоне от 500 до 1100 нм. В зависимости от растворителя коэффициент пропускания может лежать в диапазоне от 60 до 85 %. Введение легирующих элементов РЗИ: Er^{3+}, Eu^{3+}, Tb^{3+}, Yb^{3+} незначительно уменьшает коэффициент пропускания до значений от 65 до 75 % в области длин волн от 400 до 800 нм.

На ВФХ структур ZnO:Al:Er^{3+}/Si, полученных золь-гель методом, наблюдается наличие максимума в области модуляции емкости (рисунок 12, а). Выявлено, что освещение лампой накаливания приводит к росту значения емкости максимума. С увеличением частоты тестирующего сигнала емкость обогащения и величина максимума (U = +2,5 В) падают. Для структур ZnO:Al:Er^{3+}/Si, полученных золь-гель методом с различными растворителями, ВАХ на некоторых участках напряжения линеаризуются в двойных логарифмических координатах ($I \sim U^n$), что позволяет установить доминирующий механизм проводимости – ТОПЗ при наличии дискретных уровней поверхностных состояний, характерных для инжекционных токов в окислах. Для темновых и освещенных лампой накаливания и ИК-источником излучения ВАХ структур ZnO:Al:Er^{3+}/Si, полученных с использованием различных растворителей, наблюдались участки, где n находился в диапазоне значений от 2 до 5 (рисунок 12, б).



а *б*

1 – темновая; 2 – ИК-источник; 3 – лампа накаливания

Рисунок 12 – ВФХ структуры ZnO:Al:Er^{3+}/*p*-Si, полученных золь-гель методом на основе изопропилового спирта, измеренные на частоте 1 МГц (а) и ВАХ структуры ZnO:Al:Er^{3+}/*p*-Si, полученных золь-гель методом на основе 2-метоксиэтанола (б) при различных условиях освещения

Для всех исследуемых пленок, полученных золь-гель методом, на спектрах ФЛ (графики в автореферате не приведены) наблюдаются следующие полосы излучения: полоса на длине волны 390 нм, обусловленная краевой люминесценцией ZnO, полоса на длинах волн 510–540 нм, обусловленная наличием глубоких собственных и примесных дефектов ZnO, и полоса на длинах волн 650–800 нм, характерная для всех исследуемых пленок, вызванная зарядовыми состояниями кислородных вакансий и междоузельными атомами Zn.

Установлено, что максимальная чувствительность к ИК–излучению наблюдается для структуры ZnO:Al:Er^{3+}/Si при напряжении смещения +2 В (отношение значения фототока к значению темнового тока составляет 31,77), а к видимому диапазону - для структуры ZnO:Al:Yb^{3+}:Tb^{3+}/Si (отношение значения фототока к значению темнового тока составляет 139,17).

Структуры «ZnO:Me:RE^{3+}/стекло» исследовались для возможного применения в качестве конвертеров солнечного спектра для кремниевых СЭ. Установлено, что максимальный вклад в увеличение КПД кремниевого СЭ на 1,46 %, по сравнению со структурой «ZnO:Al/стекло/Si–СЭ» (КПД= 11,42 %), дает структура «ZnO:Er^{3+}:Al/стекло/Si–СЭ» (КПД = 12,38 %), которая показывает, что структура «ZnO:Er^{3+}:Al/стекло» может быть использована в качестве конвертера солнечного элемента. Таким образом показано, что исследованные пленки являются перспективными кандидатами для использования с целью повышения эффективности кремниевых солнечных элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты

1. Показано, что методом магнетронного распыления могут быть получены поликристалические слои ZnO:Er^{3+} и ZnO:Eu^{3+} с плотной упаковкой зерен с размерами от 100 до 300 нм. Поликристаллические пленки ZnO:Tb^{3+}, полученные комбинацией методов электрохимического осаждения ионов Tb^{3+} и магнетронного распыления ZnO, характеризуются отсутствием пористости и плотной упаковкой зерен с размерами от 100 до 400 нм. В случае золь-гель метода пленки ZnO:RE^{3+}:Me являются поликристаллическими с размерами зерен от 20 до 50 нм [1–А, 5–А–7–А, 9–А–11–А, 13–А, 16–А–18–А, 23–А, 24–А].

2. Установлено, что пленки ZnO:Er^{3+} и ZnO:Eu^{3+}, полученные методом магнетронного распыления, пленки ZnO:Tb^{3+}, полученные комбинацией электрохимического осаждения ионов Tb^{3+} и магнетронного распыления ZnO, а также пленки ZnO:RE^{3+}:Me, полученные золь-гель методом на

стеклянных подложках, обладают коэффициентом пропускания от 60 до 80 % в спектральном диапазоне от 370 до 1100 нм [6–А–8–А, 10–А, 23–А–25–А].

3. На основании спектров фотолюминесценции пленок ZnO:Er^{3+} и ZnO:Eu^{3+}, полученных магнетронным распылением с высокотемпературным отжигом выше 400 °С, и пленок ZnO:Tb^{3+}, полученных комбинацией электрохимического осаждения ионов Tb^{3+} и магнетронного распыления ZnO с высокотемпературным отжигом выше 750 °С, установлено, что вне зависимости от типа подложки в спектре люминесценции присутствует полоса (от 520 до 680 нм), обусловленная дефектами, индуцируемыми введением ионов РЗЭ в решетку ZnO, концентрация которых растет с повышением температуры отжига за счет диффузии ионов и встраивания их в кристаллическую матрицу ZnO. Для пленок ZnO:Al:RE^{3+} и ZnO:Ag:RE^{3+}, полученных золь-гель методом, наблюдается увеличение интенсивности фотолюминесценции (от 4 до 9 раз) с размытием краевой полосы по сравнению с нелегированной пленкой ZnO, что обусловлено увеличением собственных дефектов ZnO, индуцируемых введением ионов РЗЭ [3–А, 9–А, 13–А, 15–А, 24–А].

4. Установлено, что высокочастотные вольт-фарадные характеристики сформированных структур вне зависимости от метода их получения имеют особенность в виде плато в области модуляции емкости. При моделировании ВЧ ВФХ структур ZnO:Er^{3+}/Si и ZnO:Eu^{3+}/Si установлена глубина залегания E_{t3}=0,01 эВ дискретных ПС акцепторного типа с концентрацией $(1 – 3{,}2)\cdot 10^{12}$ $см^{-2}$, вызывающих возникновение плато в области модуляции емкости. Данное значение глубины залегания ПС не соответствует значениям (0,03 – 3,06 эВ) глубины залегания собственных дефектов и обусловлено введенной примесью РЗИ. Концентрация ловушечных центров для структур ZnO:Eu^{3+}/*p*-Si составила 10^{18} $см^{-3,}$ а для структур ZnO:Er^{3+}/n-Si находится в диапазоне $10^{18} – 10^{19}$ $см^{-3}$, что установлено с помощью метода Термана [1–А, 2–А, 4–А, 7–А, 15–А, 17–А–19–А, 21–А, 23–А].

5. На основании вольт-амперных характеристик исследуемых структур установлено, что независимо от метода получения легированных пленок оксида цинка доминирующим механизмом протекания тока является ток, ограниченный пространственным зарядом с наличием дискретных уровней поверхностных состояний [1–А, 2–А, 7–А, 12–А, 13–А, 16–А, 17–А, 19–А, 20–А–24–А, 27–А].

6. Показано, что структура ZnO:Er^{3+}/Si и ZnO:RE^{3+}:Me/Si обладает фоточувствительностью к излучению видимого и ИК-диапазона длин волн более 0,2 мА/Вт; неотоженная структура ZnO:Tb^{3+}/Si обладает фоточувствительностью более 0,3 А/Вт (интенсивность излучения 0,2 мВт/ $см^2$) в диапазоне длин волн от 405 до 1064 нм . Установлено, что

структура Al- Ni/*n*- ZnO:Tb^{3+}/*n*-Si, полученная комбинацией электрохимического осаждения ионов Tb^{3+} и магнетронного распыления ZnO, без высокотемпературного отжига, при напряжении смещения +10 В обладает на длине волны 405 нм фоточувствительностью на 0,28 А/Вт больше, чем у кремниевого фотодиода S3590-19 (0,3 А/Вт), а при увеличении напряжения смещения более +15 В фоточувствительность диодной структуры Al-Ni/ZnO:Tb^{3+}/Si выше более чем на 0,1 А/Вт относительно кремниевого фотодиода S3590-19 (0,4 – 1,2 А/Вт) во всей рабочей области спектра от 405 до 1000 нм [3–А, 8–А, 13–А, 16–А, 20–А, 23–А, 24–А, 26–А, 28–А–34–А].

7. Фотолюминесценция и фотоэффект свидетельствуют о том, что исследуемые структуры могут быть использованы в различных фоточувствительных устройствах, таких как фотодиоды и в качестве конвертерных слоев солнечных элементов, а также для дополнительной генерации неравновесных носителей заряда в гетероструктурных солнечных элементах [3–А, 7–А, 11–А, 13–А, 14–А, 20–А, 23–А, 24–А, 28–А–31–А, 34–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты исследования оптических и фотоэлектрических свойств структур «ZnO:RE^{3+}/Si,» «ZnO:Me:RE^{3+}/Si», «ZnO:Me:RE^{3+}/стекло» свидетельствуют о перспективности использования легированных пленок оксида цинка в устройствах оптоэлектроники, таких как фотодиоды и солнечные элементы. Результаты моделирования вольт-фарадных характеристик структур ZnO:RE^{3+}/Si могут быть использованы для анализа границ раздела при разработке оптоэлектронных устройств с использованием широкозонных полупроводниковых окислов.

Результаты работы могут быть использованы в организациях, занимающихся вопросами разработки и исследования фоточувствительных материалов и структур, таких как ОАО «Интеграл», ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси, БГУИР, БНТУ и др.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», Белорусского национального технического университета и могут использоваться в научной и учебной работе высших учебных заведений. Также результаты диссертационной работы применены в ООО «Солар Драфтерс» (г. Ереван, Армения) в рамках создания кремниевых солнечных элементов с пассивирующими и антиотражающими покрытиями на основе ZnO.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. Малютина-Бронская, В. В. Электрические свойства пленок оксида цинка, легированных редкоземельными элементами / В. В. Малютина-Бронская, В. Б. Залесский, Т. Р. Леонова // Доклады БГУИР. — 2011. — № 6 (60). — С. 39—43.

2–А. Получение гетероструктур SiO_2/ZnO/Si золь-гель методом / В. В. Малютина-Бронская, А. М. Поликанин, В. Б. Залесский, А. В. Семченко, В. В. Сидский, В. Е. Гайшун // Проблемы физики, математики и техники. — 2011. — № 3 (8). — С. 24—27.

3–А. Активные слои, легированные редкоземельными металлами для повышения эффективности солнечных элементов / В. В. Малютина-Бронская, В. Б. Залесский, Т. Р. Леонова, А. М. Поликанин, В. А. Мудрый, А. В. Семченко, В. В. Сидский // Проблемы физики, математики и техники. — 2012. — № 4 (13). — С. 26—29.

4–А. Анализ вольт-фарадных характеристик пленок ZnO:RE на кремниевых подложках методом Термана / В. В. Малютина-Бронская, О. А. Гребенщиков, В. Б. Залесский, Т. Р. Леонова // Конденсированные среды и межфазные границы. — 2012. — Т.14, № 4. — С. 433—437.

5–А. Золь-гель синтез активных слоёв ZnO:Al:RE^{3+} солнечных элементов / А. В. Семченко, В. В. Сидский, В. Б. Залесский, В. В. Малютина-Бронская, В. Ф. Гременок, Е. П. Зарецкая // Хімія, фізика та технологія поверхні. — 2013. — Т. 4, № 4. — С. 445—449.

6–А. Влияние температуры обработки на структурные и оптические свойства наноструктурированных ZnO:Al-плёнок, формируемых золь-гель методом / В. В. Сидский, А. В. Семченко, И. Ю. Осипова, Е. П. Зарецкая, В. Ф. Гременок, В. Б. Залесский, В. В. Малютина-Бронская // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. — 2014. — Т. 12, № 1. — С. 65—71.

7–А. Свойства пленок ZnO:Er^{3+}, полученных золь-гель методом / В. В. Малютина-Бронская, А. В. Семченко, В. В. Сидский, В. Е. Федоров // Физика и техника полупроводников. — 2017. — Т. 51, № 3. — С. 409—413.

8–А. Легированные пленки оксида цинка для конверсии спектра кремниевых солнечных элементов / В. В. Малютина-Бронская, В. Б. Залесский, А. В. Семченко, В. В. Сидский // Проблемы физики, математики и техники. — 2018. — № 3 (36). — С. 32—38.

9–А. Morphological, structural and room temperature optical properties of ZnO:Eu layers deposited by RF-Sputtering / V. Malyutina-Bronskaya, A. M. Saad,

V. Zalesski, T. Leonova, A. Mudryi, V. Fedorov // Optical Materials. — 2019. — Vol. 88. — P. 718—722.

10–А. Влияние иона-активатора на свойства пленок оксида цинка / А. В. Семченко, В. В. Сидский, Д. Л. Коваленко, В. Е. Гайшун, К. Д. Данильченко, В. В. Малютина-Бронская, Л. А. Ахоян, Г. Е. Айвазян // Вестник инженерной Академии наук Армении (ВИАА). — 2021. — Т. 18. — № 2. — С. 232—236.

11–А. Характеристики золь-гель пленок на поверхности черного кремния / Г. Е. Айвазян, А. В. Агабекян, А. В. Семченко, В. В. Сидский, Д. Л. Коваленко, В. Е. Гайшун, В. В. Малютина-Бронская, В. Б. Залесский // Известия НАН РА и НПУА. Сер. ТН. — 2021. — Т. LXXIV, № 3. — С. 314—323.

12–А. Фотоактивные свойства нанокомпозиционных покрытий ZnO_X:MgO, осажденных в вакууме и методом золь-гель синтеза / В. В. Малютина-Бронская, А. В. Семченко, А. В. Рогачев, М. А. Ярмоленко, В. В. Сидский, К. Д. Данильченко, С. А. Сорока, Э. В. Русу // Проблемы физики, математики и техники. — 2021. — № 2 (47). — С. 39—44.

13–А. Structural, optical and photoelectric properties of Tb doped ZnO thin films for device applications / V. Malyutina-Bronskaya, V. Zalesski, D. Zhyhulin, A Mudryi // Optical Materials. — 2022. — Vol. 127. — P. 112305.

14–А. Низкотемпературные процессы формирования нанокомпозитных пленок для оптоэлектроники / С. А. Хахомов, А. В. Семченко, В. Е. Гайшун, Д. Л. Коваленко, В. В. Васькевич, К. Д. Данильченко, А. А. Маевский, В. В. Малютина - Бронская, Ш. У. Юлдашев, В. Верлан // Проблемы физики, математики и техники. — 2023. — № 4 (57). — С. 48—52.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

15–А. Электрические и оптические характеристики пленок ZnO, легированных редкоземельными элементами / В. В. Малютина-Бронская, В. Б. Залесский, Т. Р. Леонова, А. В. Мудрый // Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии: матер. VII Международной научной конференции, Кисловодск, 17―22 сентября 2007 г. / Северо-Кавказский государственный технический университет; ред. Б. М. Синельников [и др.]. ― Ставрополь, 2007. ― С. 71―72.

16–А. Electrical and optical characteristics of ZnO:Er films on silicon substrates / V. V. Malyutina-Bronskaya, V. B. Zalesski, T. R. Leonova, A. V. Mudryi // Electron Devices and Materials (EDM-2007): proceedings of 8th International Siberian Workshop and Tutorials, Erlagol, 1―5 July 2007 / Novosibirsk State Technical University; eds.: A. V. Gridchin [et al.]. ― Novosibirsk, 2009. ― P. 64―66.

17–А. Фотоэлектрические характеристики пленок ZnO, легированных редкоземельными элементами / В. В. Малютина-Бронская, В. Б. Залесский, Т. Р. Леонова // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ – 2007): материалы III Междунар. науч. конф., Минск, 23 – 26 октября 2007 г. / Объединенный институт физики твердого тела и полупроводников; ред. Н. М. Олехнович [и др.]. ― Минск, 2007. ― Т. 2. ― С. 186―187.

18–А. Электрические и оптические свойства пленок ZnO, легированных Eu и Er, на подложке кремния / В. В. Малютина-Бронская, В. Б. Залесский, Т. Р. Леонова, А. В. Мудрый // Материалы и структуры современной электроники: материалы Международной научной конференции, Минск, 25―26 сентября 2008 г. / Белорусский государственный университет; ред. В. Б. Оджаев [и др.]. ― Минск, 2008. ― С. 260–262.

19–А. Малютина-Бронская, В. В. Исследование электрофизических свойств тонких пленок с встроенными наночастицами с помощью измерителя иммитенса / В. В. Малютина-Бронская // Наноматериалы: материалы II Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых, Рязань, 21―26 сентября 2009 г. / Рязанский государственный радиотехнический университет. ― Рязань, 2009. ― Т. 1. ― С. 45―48.

20–А. Фотоэлектрические свойства пленок ZnO:Tb, ZnO:Er на подложках кремния / В. В. Малютина-Бронская, В. Б. Залесский, Т. Р. Леонова, А. М. Поликанин // Лазерная физика и оптические технологии: материалы VIII Междунар. науч. конф., Минск, 27―30 сентября 2010 г. / Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси; ред. В. А. Орлович [и др.]. ― Минск, 2010. ― С. 129―132.

21–А. Свойства структур ZnO/Si, полученных золь-гель методом / /В. В. Малютина-Бронская, В. Б. Залесский, А. М. Поликанин, А. В. Семченко // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ – 2011): материалы V Междунар. науч. конф., Минск, 18―21 октября 2011 г. / ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»; ред. Н. М. Олехнович [и др.]. ― Минск, 2011. ― Т. 1. ― С. 260―262.

22–А. Свойства пленок ZnO, легированных Er^{3+}, полученных магнетронным напылением и золь-гель методом / В. В. Малютина-Бронская, А. В. Семченко, В. В. Сидский, В. Е. Федоров // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ – 2016): материалы Международной научной конференции, Минск, 22―25 ноября 2016 г. / ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»; ред. Н. М. Олехнович [и др.]. – Минск, 2016. ― Т. 3. ― С.184―186.

23–А. Properties of ZnO:Er^{3+} thin films obtained by magnetron sputtering and sol-gel synthesis / V. Malyutina-Bronskaya, A. Semchenko, V. Sidsky, V. Fedorov, V. Saladukha, A. Perets // Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2017): proceedings of IEEE 7th International Conference, Zatoka, 10–15 September 2017 / Sumy State University. ― Sumy, 2017. ― Vol. 2. ― P. 02NTF23.

24–А. Оптические свойства легированных пленок оксида цинка, полученных золь-гель методом / А. В. Котиков, В. В. Малютина-Бронская, А. В. Семченко, В. В. Сидский, Е. В. Луценко, А. В. Данильчик // Опто-, микро- и СВЧ-электроника ― 2018: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22―26 октября 2018 г. / Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси; ред. Н. С. Казак [и др.]. ― Минск, 2018. ― С. 316―319.

25–А. Свойства легированных пленок оксида цинка и гетероструктур на их основе / В. В. Малютина – Бронская, В. Б. Залесский, А. В. Семченко, В. В. Сидский // Материалы 25-й Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 24―26 мая 2018 г. / Государственный научный центр РФ АО «НПО «Орион»; ред. Л. Г. Севалкина [и др.]. ― Москва, 2018. ― С. 375―377.

26–А. Photoactive and structure properties of ZnO:*x*MgO nanocomposite sol-gel films on the surface of silicon / V. V. Sidsky, V. V. Malyutina-Bronskaya, S. A. Soroka, K. D. Danilchenko, A. V. Semchenko, V. A. Pilipenko // Research and Education: Traditions and Innovations: proceedings of the 19th Internat. Conf. on Global Research and Education (Inter-Academia 2021), Gomel, 20―22 October 2021 / Francisk Skorina Gomel University; eds.: S. A. Khakhomov [et al.] ― P. 227―235.

Тезисы докладов на научных мероприятиях

27–А. Оптические и электрические свойства пленок ZnO:Tb на подложках кремния / В. В. Малютина-Бронская, В. Б. Залесский, А. В. Мудрый // Наноструктурные материалы – 2010: Беларусь–Россия–Украина (Нано – 2010): материалы II междунар. науч. конф., Киев, 19―22 октября 2010 г. / Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины. ред. А. П. Шпак [и др.]. ― Киев, 2010. ― С. 126.

28–А. ZnO:Re/Si photodiode structures for possible solar cells applications / A. Petrov, V. Malyutina - Bronskaya, V. Zalesski, T. Romanova, A. Mudryi // Next Generation Solar Energy, From Fundamentals to Applications: proceedings of the International Conference, Erlangen, 12―14 December 2011 / Max Planck Institute for the Science of Light. ― Erlangen, 2011. ― P. 132.

29–А. Electrophysical properties of sol-gel SiO_2/ZnO/Si nanostructures / A. Semchenko, V. Sidsky, V. Gaishun, V. Malyutina-Bronskaya, A. Polikanin,

V. Zalesski // Sviridov Readings ― 2012: proceedings of 6th International Conference on Chemistry and Chemical Education, Minsk, 9―13 April 2012 / Belarusian State University; eds.: O. A. Ivashkevich [et al.]. ― Minsk, 2012. ― P. 11―12.

30–A. Heterostructures based on ZnO/Me:RE sol-gel film / V. V. Sidsky, A. V. Semchenko, V. B. Zalesski, V. V. Malyutina-Bronskaya, V. A. Solodukha, A. N. Pyatlitski, N. S. Kovalchuk, W. Strek // Proceedings of the International Conference on Rare Earth Materials, Wroclaw, 16―18 May, 2018 / Institute of Low Temperature and Structure Research PAS. ― Wroclaw, 2013. ― P. 38.

31–A. ZnO:Al:Er^{3+} sol-gel films as active layers for solar cells / A. V. Semchenko V. V. Sidsky, V. B. Zalesski, V. V. Malyutina-Bronskaya, W. Strek// Proceedings of the International Conference on Rare Earth Materials, Wroclaw, 26―28 April, 2013 / Institute of Low Temperature and Structure Research PAS. ― Wroclaw, 2013. ― P. 61.

32–A. Наноструктурированные золь-гель пленки на основе оксида цинка для оптоэлектронных приборов / А. В. Петров, В. Б. Залесский, В. В. Малютина-Бронская, А. В. Семченко, В. В. Сидский // Наноструктурные материалы ― 2014: Беларусь―Россия―Украина: материалы IV Междунар. науч. конф., Минск, 7―10 октября 2014 г. / ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»; ред. П. А. Витязь [и др.]. ― Минск, 2014. ― С. 362.

33–A. Малютина-Бронская, В. В. Фотоэлектрические свойства пленок оксида цинка легированные редкоземельными металлами / В. В. Малютина - Бронская, А. В. Семченко, В. Б. Залесский // Фотоника ― 2015: материалы Российской конференции по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники, Новосибирск, 12―16 октября 2015 г. / Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН; ред. Л. А. Ильина [и др.]. ― Новосибирск, 2015. ― С. 123.

34–A. ZnO/Me sol-gel film for solar cells and photodetectors / S. A. Khakhomov, A. V. Semchenko, V. V. Sidsky, V. V. Malyutina-Bronskaya, S. A. Soroka, V. B. Zalesski, N. S. Kovalchuk, A. N. Pyatlitski, V. A. Solodukha // Recent Advances in Technology Research and Education: INTER-ACADEMIA: International Conference on Global Research and Education, Kaunas, 24―27 September 2018. ― Cham: Springer, 2019. ― P. 81.

РЭЗЮМЕ

Малюціна-Бронская Вікторыя Уладзіміраўна

Электрафізічныя і аптычныя ўласцівасці структур на аснове плёнак аксіду цынку, легіраваных іёнамі рэдказямельных элементаў, для цвёрдацельных оптаэлектронных прылад

Ключавыя словы: аксід цынку, іёны рэдказямельных элементаў, гетэраструктуры, уласцівасці, фотадыёдныя структуры, сонечныя элементы

Мэта працы: устанаўленне залежнасці аптычных і фотаэлектрычных характарыстык структур «метал - легіраваны аксід цынку - крэмній» у залежнасці атрыманых метадамі магнетроннага распылення, камбінаванага метаду на аснове электрахімічнага аблогі іёнаў прымешкі і метаду магнетроннага распылення, а таксама золь-гель метаду, з легіруючымі прымешкамі для прымянення ў оптаэлектронах.

Метады даследавання: сканавальная электронная мікраскапія, вымярэнне спектраў прапускання, фоталюмінесцэнцыі, вымярэнне вольт-амперных і вольт-фарадных характарыстык, вызначэнне фотаадчувальнасці.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: у залежнасці ад метаду атрымання, тонкія плёнкі легіраванага ZnO валодаюць полікрышталічнай структурай з памерам зерняў ад 50 да 400 нм і каэфіцыентам прапускання ад 60 да 80% у спектральным дыяпазоне ад 370 да 1100 нм. Легіраванне рэдказямельных элементаў іёнамі прыводзіць да фармавання ўзроўняў павярхоўных станаў з глыбінёй залягання ў забароненай зоне паўправадніка парадку 0,01 эВ. Устаноўлены ўплыў дадзеных рэдказямельных элементаў на фарміраванне спектраў фоталюмінесцэнцыі і фотаадчувальнасці. Структура Al-Ni/*n*-ZnO:Tb3+/*n*-Si на даўжыні хвалі 405 нм пры напрузе зрушэння +10 В валодае вялікім значэннем фотаадчувальнасці ў параўнанні з крамянёвым фотадыёдам S3590-19 (0,3 А/Вт) на 0,28 А/Вт. Паказана, што пры выкарыстанні структуры «ZnO:Er:Al/ шкло» у параўнанні са структурай «ZnO:Al/шкло» можна павысіць эфектыўнасць пераўтварэння выпраменьвання крэмніевым сонечным элементам на 1,46%.

Рэкамендацыі па выкарыстанню: атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны ў арганізацыях, якія займаюцца мікра- і оптаэлектронікай, а таксама ва ўстановах вышэйшай адукацыі пры падрыхтоўцы спецыялістаў у галіне цвердацельнай электронікі, мікра- і нанаэлектронікі.

Галіна ўжывання: мікра- і оптаэлектроніка.

РЕЗЮМЕ

Малютина-Бронская Виктория Владимировна

Электрофизические и оптические свойства структур на основе пленок оксида цинка, легированных ионами редкоземельных элементов, для твердотельных оптоэлектронных устройств

Ключевые слова: оксид цинка, ионы редкоземельных элементов, гетероструктуры, свойства, фотодиодные структуры, солнечные элементы

Цель работы: установление взаимосвязи оптических и фотоэлектрических характеристик структур «металл – легированный оксид цинка – кремний», полученных методами магнетронного распыления, комбинацией методов электрохимического осаждения ионов примеси и магнетронного распыления, а также золь-гель методом, с легирующими примесями для применения в оптоэлектронных устройствах.

Методы исследования: сканирующая электронная микроскопия, измерение спектров пропускания, фотолюминесценции, вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, определение фоточувствительности.

Полученные результаты и их новизна: в зависимости от метода получения тонкие пленки легированного ZnO обладают поликристаллической структурой с размером зерен от 50 до 400 нм и коэффициентом пропускания от 60 до 80 % в спектральном диапазоне от 370 до 1100 нм. Легирование ионами редкоземельных элементов приводит к формированию уровней поверхностных состояний с глубиной залегания в запрещенной зоне полупроводника порядка 0,01 эВ и установлено их влияния на формирование спектров фотолюминисценции и фоточувствительности. Структура Al- Ni/*n*- ZnO:Tb^{3+}/*n*-Si на длине волны 405 нм при напряжении смещения +10 В обладает большим значением фоточувствительности по сравнению с кремниевым фотодиодом S3590-19 (0,3 А/Вт) на 0,28 А/Вт. Показано, что при использовании структуры «ZnO:Er:Al/стекло» по сравнению со структурой «ZnO:Al/стекло» можно повысить эффективность преобразования излучения кремниевым солнечным элементом на 1,46 %.

Рекомендации по использованию: полученные результаты могут быть использованы в организациях, занимающихся микро- и оптоэлектроникой, а также в учреждениях высшего образования при подготовке специалистов в области твердотельной электроники, микро- и наноэлектроники.

Область применения: микро- и оптоэлектроника.

SUMMARY

Victoria Malyutina-Bronskaya

Electrophysical and optical properties of structures based on zinc oxide films doped with rare earth ions for solid-state optoelectronic devices

Keywords: zinc oxide, ions of rare earth elements, heterostructures, properties, photodiode structures, solar cells

The goal of the present research is establishing the relationship between the optical and photoelectric characteristics of "metal-doped zinc oxide-silicon" structures obtained by magnetron sputtering, a combination of electrochemical deposition of impurity ions and magnetron sputtering, and the sol-gel method, with doping impurities for the use in optoelectronic devices.

Research methods: scanning electron microscopy, measurement of transmission spectra, photoluminescence, measurement of current-voltage and capacitance-voltage characteristics, determination of photosensitivity.

Obtained results and their novelty: depending on the production method, thin films of doped ZnO have a polycrystalline structure with a grain size from 50 to 400 nm and a transmittance from 60 to 80% in the spectral range from 370 to 1100 nm. Doping of the rare earth element with ions leads to the formation of surface state levels with a depth of about 0.01 eV in the semiconductor band gap. Influence of the rare earth elements on the formation of photoluminescence and photosensitivity spectra has been established. The Al-Ni/*n*-ZnO:Tb^{3+}/*n*-Si structure at a wavelength of 405 nm with a bias voltage of +10 V has a higher photosensitivity value compared to the silicon photodiode S3590-19 (0,3 A/W) by 0,28 A/W. It has been shown that when using the «ZnO:Er:Al/glass» structure, the efficiency of radiation conversion by a silicon solar cell can be increased by 1,46% compared to the «ZnO:Al/glass» structure.

Recommendations for use: the obtained results can be used in organizations engaged in micro- and optoelectronics, as well as in higher education institutions for training specialists in the field of solid-state electronics, micro- and nanoelectronics.

Field of application: micro- and optoelectronics.

Научное издание

Малютина-Бронская Виктория Владимировна

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ОКСИДА ЦИНКА, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 05.27.01 - твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Подписано в печать27.01.2026. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л.1,63. Уч.-изд. л 1,6. Тираж 60 экз. Заказ 15.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014, №2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск