

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ГО «НПЦ НАН Беларуси
по материаловедению»


В.М. Федосюк
«27» 2026 г.

**ОТЗЫВ ОППОНИРУЮЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
на диссертационную работу
Малютиной-Бронской Виктории Владимировны
«Электрофизические и оптические свойства структур на основе пленок
оксида цинка, легированных ионами редкоземельных элементов, для
твердотельных оптоэлектронных устройств»,
представленной на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на
квантовых эффектах.**

1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки со ссылкой на область исследования паспорта специальности

Диссертация посвящена установлению влияния легирования ионами редкоземельных элементов на оптические, электрофизические и фотоэлектрические свойства пленок и структур на основе ZnO для их последующего практического применения в твердотельных устройствах оптоэлектроники.

Проведено моделирование высокочастотных вольт-фарадных характеристик на основе метода Термана, с учетом дискретных поверхностных состояний структур «металл – окисел – полупроводник» позволившие объяснить экспериментальные результаты. Проведен математический анализ вольт-амперных характеристик, который позволил установить механизм протекания тока в структурах «металл - легированный оксид цинка - кремний» как ограниченный пространственным зарядом при наличии дискретных ловушечных уровней. Установлено влияние легирования ионами редкоземельных элементов на оптические и фотоэлектрические свойства твердотельных структур на основе ZnO полученных методами магнетронного напыления, комбинацией методов электрохимического осаждения ионов Tb³⁺ и магнетронного распыления, и

золь-гель методом. Экспериментально установлены зависимости фоточувствительности от температуры отжига и напряжения смещения твердотельных структур Al-Ni/ZnO:Re³⁺/Si (Re³⁺: Er³⁺ и Tb³⁺), перспективных для применения в твердотельных оптоэлектронных устройствах. Установлена возможность повышения эффективности кремниевых солнечных элементов при использовании структур ZnO:Er³⁺:Me/стекло.

Содержание диссертации соответствует п. 1, 2, 4 раздела III паспорта специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах: «1. Создание (включая разработку конструкций и технологических маршрутов изготовления) и функционирование изделий твердотельной электроники, радиоэлектронных компонентов и систем микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах, нано- и микросенсоров. 2. Физические и технические аспекты модификации изделий и приборов по п. 1. 4. Физические и математические модели изделий, устройств и технологических процессов по п. 1, в том числе для систем автоматизированного проектирования».

Таким образом, положения и выводы представленной диссертации полностью соответствуют физико-математической отрасли наук и паспорту специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах:

2. Научный вклад соискателя в решение научной задачи с оценкой его значимости

Научный вклад соискателя состоит в получении теоретических и экспериментальных данных о влиянии легирующих примесей, методов получения и режимов формирования структур «металл - легированный оксид цинка - кремний» на оптические, электрофизические и фотоэлектрические характеристики, что определяет перспективы применения данных структур в оптоэлектронике.

Высокая значимость научного вклада соискателя подтверждается 34-мя печатными работами (в их числе - 14 статей в научных рецензируемых журналах, 11 статей в сборниках трудов научных конференций и 9 тезисов докладов) опубликованными в рецензируемых научных журналах индексируемыми в международных базах, данных и хорошо апробированы на конференциях высокого уровня, а также 3 актами внедрения.

3. Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень

Диссертационная работа содержит новые результаты, заключающиеся в исследовании морфологических, оптических и электрофизических и

фотоэлектрических свойств слоев оксида цинка, легированного редкоземельными элементами, установлении влияния легирующей примеси и технологических методов и режимов на их функциональные свойства.

К наиболее значимым результатам работы, отличающимся существенной научной новизной, следует отнести следующие:

1. Впервые представлены результаты моделирования высокочастотных вольт-фарадных характеристик на основе метода Германа, с учетом дискретных поверхностных состояний структур «металл – окисел – полупроводник» ($\text{ZnO:Er}^{3+}/\text{Si}$, $\text{ZnO:Tb}^{3+}/\text{Si}$, $\text{ZnO:Er}^{3+}:\text{Al}/\text{Si}$) 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 $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

2. На основе анализа вольт-амперных характеристик при напряжениях смещения более $\pm 0,7-12 \text{ В}$ установлены механизм протекания тока при комнатной температуре структур $\text{ZnO:RE}^{3+}/\text{Si}$, $\text{ZnO:Al:RE}^{3+}/\text{Si}$ ($\text{RE}^{3+} = \text{Er}^{3+}$, Eu^{3+} , Tb^{3+}), как ток, ограниченный пространственным зарядом при наличии дискретных ловушечных уровней.

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

4. Продемонстрировано, что фоточувствительность твердотельных структур $\text{Al-Ni/ZnO:Re}^{3+}/\text{Si}$ ($\text{Re}^{3+}: \text{Er}^{3+}$ и Tb^{3+}) зависит от температуры отжига и напряжения смещения. Экспериментально установлено, что легирование ионами Er^{3+} после отжига $600 \text{ }^\circ\text{C}$ позволяет достигнуть фоточувствительности $0,1-0,45 \text{ мА/Вт}$ в диапазоне длин волн от 600 до 950 нм при напряжении смещения 0 В, а легирование ионами Tb^{3+} без отжига позволяет достигнуть фоточувствительности $0,3-1,0 \text{ А/Вт}$ в диапазоне длин волн от 400 до 1000 нм при напряжении смещения более +10 В.

5. Продемонстрировано, что 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 повысить КПД на 1,46 % по сравнению с « ZnO:Al/стекло » и использовать их в качестве конвертеров кремниевых солнечных элементов.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в установлении комплексных свойств исследуемых структур полученных методом магнетронного напыления, комбинированным методом и золь-гель методом, которые позволяют установить закономерности физических процессов, протекающих в гетероструктурах ZnO/Si, в том числе учесть влияние поверхностных состояний на границе раздела, а также решить задачу по повышению фоточувствительности оптоэлектронных устройств на основе этих гетероструктур.

4. Замечания по диссертации

1. В диссертационной работе исследовано влияние высокотемпературного отжига (900–1100 °С) на свойства плёнок ZnO:RE³⁺ и структур на их основе. Полученные результаты представляют несомненный научный интерес, однако представляется целесообразным более подробно обсудить технологическую совместимость указанных температурных режимов с современными процессами кремниевой микро- и оптоэлектроники. Отжиг при столь высоких температурах может сопровождаться изменением морфологии плёнок, деградацией границы раздела, усилением диффузионных процессов и перераспределением дефектных состояний. В то же время в работе показано, что ряд наиболее выраженных фотоэлектрических эффектов наблюдается именно в неотожжённых структурах. В этой связи представляется важным дополнительно обсудить физические причины деградации фоточувствительности после отжига и оценить возможность стабилизации требуемых характеристик без использования высокотемпературной обработки.

2. При моделировании вольт-фарадных характеристик выявлен дискретный уровень с энергией порядка 0,01 эВ, который интерпретируется как акцепторное состояние. Вместе с тем физическая природа данного уровня раскрыта недостаточно детально. Представляется целесообразным более развернуто обсудить возможные механизмы его формирования.

3. В первой главе подробно рассмотрены методы получения слоев оксида цинка, в том числе наноструктурированных, однако выбор методов формирования структур, которые использовал соискатель, недостаточно обоснованы.

4. В работе обсуждаются данные по фотолюминесценции и фототоку для разных типов легирования (Er³⁺, Tb³⁺, Eu³⁺ и др.). Более детальное обсуждение различий и особенностей поведения этих систем, а также сравнение с литературными данными, могло бы дополнительно

подчеркнуть научную новизну исследования и показать преимущества предложенных методик.

5. В тексте диссертации имеются опечатки, синтаксические и орфографические ошибки: на стр. 69 в обозначении дефектов употреблён лишний знак «-»; на стр. 94 некорректно разнесены обозначение (λ) и его значение; в разделе «Заключение», вывод 6, на стр. 131, допущена ошибка в слове «неотожженная (структура)» и др.; дублирование предложения на стр. 94-95.

6. Рисунок 5.3 и его описание в тексте диссертации не дают информации о том, для каких редкоземельных элементов измерены спектры пропускания пленок ZnO:Al:RE^{3+} .

Сделанные замечания не затрагивают сути и качества работы и не влияют на общую высокую оценку проведенных исследований и полученных результатов.

5. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

По совокупности представленных новых достоверных и научно обоснованных результатов, подтвержденных научными публикациями в журналах высокого научного уровня и докладами по теме диссертации на научных конференциях, аргументированных выводов, используемых методов исследования и интерпретации полученных результатов, качественного оформления диссертации и автореферата можно сделать вывод о том, что научная квалификация соискателя Малютиной-Бронской В.В. соответствует ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

6. Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные в рамках выполнения диссертационной работы результаты моделирования вольт-фарадных характеристик структур $\text{ZnO:RE}^{3+}/\text{Si}$ могут быть использованы для анализа границ раздела при разработке оптоэлектронных устройств с использованием широкозонных полупроводниковых окислов. Результаты по структурным, оптическим, электрическим и фотоэлектрическим характеристикам структур $\text{ZnO:RE}^{3+}/\text{Si}$ могут быть использованы в организациях, занимающихся вопросами разработки и исследования фоточувствительных материалов и структур, а также для подготовки инженеров и научных сотрудников, обладающих необходимыми знаниями и практическими навыками в области оптоэлектроники. Автором получено 2 акта о практическом использовании результатов в учебном процессе для студентов учреждений образования

«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», Белорусский национальный технический университет. Результаты диссертационного исследования в части оптических свойств тонких пленок ZnO могут использоваться в качестве пассивирующих и антиотражающих покрытий (получен 1 акт использования результатов диссертационной работы в ООО «Солар Драфтерс», г. Ереван, Армения).

Заключение

Диссертация Малютиной-Бронской Виктории Владимировны «Электрофизические и оптические свойства структур на основе пленок оксида цинка, легированных ионами редкоземельных элементов, для твердотельных оптоэлектронных устройств» представляет собой законченную научную работу, отвечающую требованиям Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, а ее автор заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах, за:

- установление зависимостей оптических характеристик структур «легированный оксид цинка - стекло», электрофизических 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 от легирующей примеси и технологических режимов их формирования;
- установление механизма протекания тока структур «металл - легированный оксид цинка - кремний» полученных методами магнетронного распыления, комбинацией методов электрохимического осаждения ионов примеси и магнетронного распыления, а также золь-гель методом в зависимости от легирующей примеси и режимов их формирования;
- определение легирующей примеси и технологических режимов для формирования структур «металл - легированный оксид цинка - кремний» и «легированный оксид цинка - стекло» характеризующиеся эффективным фотоэлектрическим преобразованием излучения видимого и инфракрасного диапазона длин волн;

Совокупность названных результатов является существенным вкладом в физику и технологию создания пленок и структур на основе легированного оксида цинка для новых перспективных элементов оптоэлектроники.

Отзыв о диссертационной работе Малютиной-Бронской Виктории Владимировны «Электрофизические и оптические свойства структур на основе пленок оксида цинка, легированных ионами редкоземельных элементов, для твердотельных оптоэлектронных устройств» согласно приказа генерального директора ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» от 09.02.2026 № 17 был обсужден и принят на заседании объединенного научного семинара (протокол № 2 от 19.02.2026), на котором соискатель Малютина-Бронская В.В. выступила с докладом.

На заседании присутствовали:

д. физ.-мат. наук, доцент Карпинский Д.В., д. физ.-мат. наук, доцент Семченко А.В., к. физ.-мат. наук, доцент Живулько В.Д., к. физ.-мат. наук, доцент Желудкевич А.Л., к. физ.-мат. наук, доцент Римский Г.С., к. физ.-мат. наук, доцент Петров А.В., к. физ.-мат. наук, доцент Живулько А.М., к. физ.-мат. наук, доцент Зубарь Т.И., к. физ.-мат. наук, доцент Радюш Ю.В., к. физ.-мат. наук, доцент Митюк В.И., к. физ.-мат. наук, доцент Станчик А.В., к. физ.-мат. наук Ластовский С.Б., к. физ.-мат. наук Бушинский М.В., к. физ.-мат. наук Гончаров В.С., к. физ.-мат. наук Терешко Н.В., к. физ.-мат. наук Лановский Р.А., к. физ.-мат. наук Огородников Д.А.

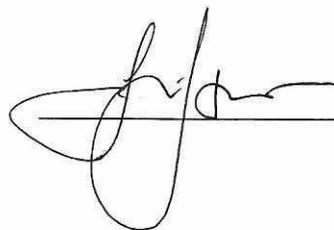
всего 29 человек, из них из них – 2 доктора наук и 15 кандидатов наук.

Результаты открытого голосования:

«за» – 17, «против» – нет, «воздержавшихся» – нет.

Председатель

д.ф.-м.н., доцент
заместитель генерального
директора ГО «НПЦ НАН Беларуси
по материаловедению»


Д.В. Карпинский

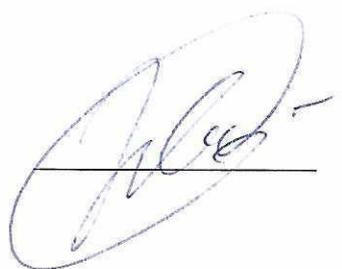
Эксперт

к.ф.-м.н., доцент
заведующий лабораторией
оптической спектроскопии
полупроводников


В.Д. Живулько

Ученый секретарь на заседании

к.ф.-м.н., доцент
заведующий лабораторией физики
магнитных материалов


А.Л. Желудкевич