

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
«НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
БЕЛАРУСИ ПО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЮ»

Объект авторского права

УДК 538.958(043.3)+539.216.2:537.226(043.3)

РОМАНОВ
Иван Александрович

**СТРУКТУРА И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ СЛОЕВ ОКСИДА
И НИТРИДА КРЕМНИЯ И НАНОКОМПОЗИТОВ
«SiO₂ С НАНОКРИСТАЛЛАМИ SnO₂»**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Минск 2025

Научная работа выполнена в Белорусском государственном университете.

Научный руководитель	Комаров Фадей Фадеевич , доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН Беларуси, заведующий лабораторией элионики Научно-исследовательского учреждения «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета
Официальные оппоненты:	Гременок Валерий Феликсович , доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики полупроводников Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» Петлицкий Александр Николаевич , кандидат физико-математических наук, доцент, начальник Государственного центра «Белмикроанализ» научно-технического центра ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»
Оппонирующая организация	Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита состоится «23» декабря 2025 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.06.01 при Государственном научно-производственном объединении «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» (ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению») по адресу: 220072, г. Минск, ул. Петруся Бровки, 19, пом. 5. Тел. +375(17)378-11-68 (ученый секретарь совета), e-mail: ifttnanb@physics.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Автореферат разослан «___» ноября 2025 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций
доктор физико-математических наук

 Д. В. Карпинский

ВВЕДЕНИЕ

Основной проблемой, ограничивающей быстродействие современных вычислительных устройств, является недостаточно высокая скорость обмена информацией между памятью и процессором. Это ограничение можно преодолеть путем замены электрической коммутации на оптическую. Наиболее перспективными материалами для создания элементов кремниевой оптоэлектроники являются кремний, оксид, нитрид и оксинитрид кремния. На основе этих материалов разрабатываются оптические волноводы, микрорезонаторы, мультиплексоры, а создание светоизлучающих структур на кремниевой платформе откроет возможности реализации оптоэлектронной развязки электрических цепей на одном кристалле, что позволит уменьшить габариты и стоимость разрабатываемых электронных устройств.

Различные подходы для улучшения эмиссионных свойств аморфных пленок оксида и нитрида кремния разрабатываются уже не один десяток лет. Среди них синтез слоев SiN_x и SiO_x с избыточным содержанием кремния в сравнении со стехиометрией, а также создание многослойных структур с активными (светоизлучающими) и барьерными слоями. Интерес к исследованию структур типа $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ и $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ обусловлен перспективами разработки на их основе комбинированных систем излучатель – мультиплексор – волновод – демультиплексор. Аналогом систем с барьерными и светоизлучающими слоями являются диэлектрические пленки SiO_2 и Si_3N_4 со встроенными нанокристаллами различных полупроводников. Для уменьшения габаритов элементов кремниевой фотоники наиболее интересными являются нанокристаллы, излучающие свет в коротковолновой области спектра (300–450 нм). Так, например, интенсивное излучение в этой области демонстрирует наноструктурированный диоксид олова.

Наиболее важным методом исследования светоизлучающих структур с точки зрения их практического применения является электролюминесценция (ЭЛ). Метод ЭЛ позволяет установить взаимосвязь электрофизических и оптических свойств светоизлучающих слоев, определить внешний квантовый выход приборных структур, исследовать деградацию диэлектрических слоев. Комплексное исследование структурных, электрофизических и люминесцентных свойств систем на основе слоев SiO_2 , SiN_x , а также нанокомпозитов « SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 » является необходимым этапом при разработке оптоэлектронных компонентов на их основе.

Таким образом, вышеизложенное определяет актуальность темы представленной диссертации, посвященной изучению структуры, оптических свойств и электролюминесценции сформированных на кремнии

диэлектрических композиций на основе слоев оксида и нитрида кремния и слоев SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 .

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами) и темами

Диссертационная работа выполнена в Белорусском государственном университете в рамках плана НИР БГУ. Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований, а также приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 гг., утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156. Диссертационная работа выполнялась в рамках следующих научных проектов и государственных программ: ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» на 2016–2020 гг., подпрограмма «Микро- и наноэлектроника» НИР «Разработать физико-технологические режимы формирования и исследовать параметры приборных структур на основе тонких и сверхтонких нестехиометрических слоев SiN_x » (2016–2018 гг., № ГР 20162096); НИР «Разработка физико-технологических режимов формирования и исследование многослойных структур на основе композиций нитрида и оксида кремния для кремниевой оптоэлектроники» (2019–2020 гг., № ГР 20190681); НИР «Разработка методики анализа структурных и оптических характеристик тонких диэлектрических слоев с металлическими и полупроводниковыми нанокластерами, а также многослойных композиций «оксид/нитрид кремния» на базе комбинационного рассеяния света, фото- и электролюминесценции» (2019–2020 гг., № ГР 20190682); ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» на 2021–2025 гг., подпрограмма «Микро- и наноэлектроника», НИР «Разработка физико-технологических процессов создания светоизлучающих и фотоприемных приборов, а также систем энергонезависимой резистивной памяти на нитриде, оксиде и оксинитриде кремния на кремнии» (2021–2025 гг., № ГР 20212595); проект БРФФИ № Ф17КИГ-005 «Разработать и исследовать создание светоизлучающих тонких пленок и приборов на основе наноразмерных сверхрешеток и многослойных структур» (2017–2019 гг., № ГР 20171388); гранты студентов и аспирантов БГУ «Разработка физико-технологических режимов формирования структур SiN_x/Si для применений в кремниевой оптоэлектронике и фотонике» (2017 г., № ГР 20170705); «Разработка методики регистрации спектров электролюминесценции и исследование светоизлучающих структур на основе нитрида, оксида и оксинитрида кремния для применений в кремниевой оптоэлектронике» (2018 г., № ГР 20180556).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель диссертационной работы заключается в установлении закономерностей изменения люминесцентных и электрофизических свойств диэлектрических пленок на основе слоев нитрида и оксида кремния, а также слоев оксида кремния, имплантированных ионами олова, в зависимости от их элементного и структурно-фазового состава.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- установление корреляции соотношения компонентов Si/N в слоях нестехиометрического нитрида кремния в одно-, двух- и трехслойных диэлектрических пленках на кремниевых подложках (SiN_x/Si , $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{SiO}_{y2}/\text{SiN}_x/\text{SiO}_{y1}/\text{Si}$) с оптическими свойствами слоев нитрида кремния;
- определение влияния количества прошедшего через образцы заряда на электролюминесценцию одно-, двух- и трехслойных диэлектрических пленок (SiO_2/Si , SiN_x/Si , $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{SiO}_{y2}/\text{SiN}_x/\text{SiO}_{y1}/\text{Si}$);
- определение зависимости структурно-фазового состава, электрофизических свойств, интенсивности и спектральной формы полос фото- и электролюминесценции нанокомпозитов « SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 » от величины флюенса имплантации ионов Sn^+ в оксид кремния и температуры последующих термообработок.

Объект исследования – пластины кремния с диэлектрическими пленками на основе слоев нитрида и оксида кремния, полученными на технологическом оборудовании ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл», а также пластины кремния с термически выращенными слоями диоксида кремния, имплантированными различными флюенсами ионов олова. Имплантация проводилась в Институте физики твердого тела Йенского университета им. Ф. Шиллера (Германия).

Предметом исследования являлись структурные, люминесцентные и электрофизические свойства диэлектрических пленок на основе слоев оксида и нитрида кремния и нанокомпозитов, сформированных имплантацией ионов олова в слой оксида кремния с последующими термообработками.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в получении следующих результатов, практически важных для создания светоизлучающих структур на основе кремниевой технологии.

Впервые исследованы электролюминесцентные свойства двухслойных ($\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$) и трехслойных ($\text{SiO}_{y2}/\text{SiN}_x/\text{SiO}_{y1}/\text{Si}$) диэлектрических пленок, а также нанокомпозитов « SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 » в системе электролит – диэлектрик – полупроводник.

Показано, что фотолюминесценция (ФЛ) композиций $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{SiO}_{y2}/\text{SiN}_x/\text{SiO}_{y1}/\text{Si}$, возбуждаемая лазером с энергией квантов 3,82 эВ, обусловлена электронными переходами в слоях SiN_x , а ЭЛ обусловлена люминесценцией дефектов в слоях оксида кремния, а также слоях оксинитрида кремния, образовавшихся на границах нитрид – оксид.

По результатам изучения эффекта длительного пропускания электрического тока через композиции $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{SiO}_{y2}/\text{SiN}_x/\text{SiO}_{y1}/\text{Si}$ на интенсивность полос ЭЛ установлено, что нитрид кремния, нанесенный поверх слоя оксида кремния, предохраняет слой оксида от деградации электролюминесценции и пробоя.

Показано, что имплантация ионов Sn^+ с энергией 80 кэВ флюенсом $2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ с последующим отжигом на воздухе (900 °С, 60 мин) приводит к увеличению внешнего квантового выхода ЭЛ пленки диоксида кремния на три порядка величины.

Установлено, что уменьшение квантового выхода ЭЛ нанокмпозитов « SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 » по мере увеличения флюенса имплантации обусловлено снижением тока носителей заряда, участвующих в процессах возбуждения ЭЛ, за счет возрастания концентрации радиационных дефектов в имплантированных слоях.

Положения, выносимые на защиту

1. В диэлектрических пленках $\text{SiN}_{1,17}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, $\text{SiO}_{1,86}/\text{SiN}_{0,89}/\text{SiO}_{1,86}/\text{Si}$ и $\text{SiO}_{1,86}/\text{SiN}_{1,22}/\text{SiO}_{1,75}/\text{Si}$ фотолюминесценция при возбуждении лазером с энергией квантов 3,82 эВ обусловлена свечением слоя нитрида кремния, причем спектральное положение максимума полосы фотолюминесценции варьируется в диапазоне 1,8–3,3 эВ в зависимости от концентрации избыточного кремния в слое SiN_x (18–4 %), в то время как электролюминесценция вызвана свечением дефектов в слоях оксида кремния.

2. Для пленок SiO_2/Si , $\text{SiN}_{1,17}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{SiO}_{1,86}/\text{SiN}_{0,89}/\text{SiO}_{1,86}/\text{Si}$ установлены закономерности изменения интенсивности полосы ЭЛ с максимумом при 1,9 эВ:

– для $\text{SiO}_2(\text{термический})/\text{Si}$ прохождение заряда $270 \text{ мКл} \cdot \text{см}^{-2}$ при плотности тока $0,15 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$ приводит к уменьшению интенсивности ЭЛ в 2,8 раза;

– для $\text{SiN}_{1,17}/\text{SiO}_2(\text{термический})/\text{Si}$ прохождение заряда $2 \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}$ при плотности тока $0,6 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$ приводит к увеличению интенсивности ЭЛ в 1,4 раза;

– нитрид кремния, нанесенный поверх слоя SiO_2 , уменьшает квантовый выход ЭЛ, однако предохраняет слой SiO_2 от деградации электролюминесценции и пробоя при плотностях тока до $0,6 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$, что

может быть использовано при разработке устойчивых к деградации светоизлучающих структур на основе кремния.

3. Установлены закономерности изменения структурно-фазового состава, фото- и электролюминесценции нанокompозитов «SiO₂ с нанокристаллами SnO₂» в зависимости от флюенса имплантации ионов олова в SiO₂ и температуры отжига:

- имплантация ионов олова с энергиями 80 и 200 кэВ флюенсами $(2,5, 5 \text{ и } 10) \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в слой SiO₂ с последующим отжигом на воздухе при 800 и 900 °С приводит к формированию преципитатов, преимущественно состоящих из кристаллической фазы SnO₂;

- после отжига при 800 °С слоев SiO₂, имплантированных ионами олова с энергией 200 кэВ, в спектре ФЛ появляется полоса с максимумом при 3,1 эВ; увеличение температуры отжига до 900 °С приводит к возрастанию интенсивности этой полосы в 1,3–1,6 раза;

- имплантация ионов олова с энергией 80 кэВ флюенсом $2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в структуру SiO₂(термический)/Si и последующая термообработка при 900 °С на воздухе приводит к появлению в спектре ЭЛ полосы с максимумом при 3,2 эВ и возрастанию внешнего квантового выхода ЭЛ на три порядка величины.

4. Уменьшение квантового выхода электролюминесценции в нанокompозитах «SiO₂ с нанокристаллами SnO₂» с увеличением флюенса имплантации от $2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ до $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ обусловлено снижением тока носителей заряда, участвующих в процессах возбуждения ЭЛ, вследствие возрастания концентрации радиационных дефектов в имплантированных слоях. Установленные закономерности и полученная величина измеренного внешнего квантового выхода (~1 %) позволяют более эффективно использовать существующие технологические процессы для изготовления приборных структур кремниевой фотоники.

Личный вклад соискателя ученой степени

Представленные в диссертации основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Лично соискателем разработан и реализован измерительный спектрометрический комплекс для регистрации спектров фото- и электролюминесценции, проведены измерения спектров ФЛ, ЭЛ, вольт-амперных характеристик светоизлучающих структур, а также обработка экспериментальных данных и их интерпретация. Постановка цели и задач исследования проведена совместно с научным руководителем. В планировании эксперимента и обсуждении результатов принимали участие кандидаты физико-математических наук Л. А. Власукова, И. Н. Пархоменко, А. В. Мудрый, В. Д. Живулько. Формирование диэлектрических пленок на основе слоев нитрида и оксида кремния, а также исследования методами

сканирующей электронной микроскопии и спектральной эллипсометрии проводились при содействии кандидата технических наук Н. С. Ковальчук. Имплантация ионов олова проведена профессором E. Wendler Измерение спектров резерфордского обратного рассеяния, проведение исследований методами просвечивающей электронной микроскопии проводилось при содействии М. А. Моховикова и О. В. Мильчанина.

Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих международных научно-практических конференциях: VIII, IX Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела» (Минск, 2018, 2021), I международная научно-техническая конференция «Опто-, микро- и СВЧ-электроника» (Минск, 2018), 11-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2018» (Минск, 2018), XIII, XIV Международная научно-техническая конференция «Квантовая электроника» (Минск, 2021, 2023), 12-я, 15-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, 2017, 2023), 18th International Conference «Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter» (Tomsk, Russia, 2018), 8th, 9th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (Zatoka, Ukraine, 2018, Odessa, Ukraine, 2019), 21st International Conference on Defects in Insulating Materials (ICDIM) (Astana, Kazakhstan, 2024).

Результаты исследования внедрены в образовательный процесс на факультете радиофизики и компьютерных технологий БГУ (получено 2 акта о практическом использовании результатов исследования в учебном процессе). Получен акт о практическом использовании результатов научно-технического проекта на предприятии ОАО «Интеграл».

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 21 научной работе, в числе которых 8 статей в научных изданиях, включенных в перечень изданий, и в иностранных научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий (общим объемом 7 авторских листов), 11 статей в сборниках материалов научных конференций, 2 тезиса доклада на научных конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Полный объем диссертации

составляет 164 страницы, в том числе 55 рисунков занимают 25 страниц, 13 таблиц занимают 5 страниц, список использованных источников содержит 263 наименования на 27 страницах, включая 21 публикацию соискателя на 4 страницах, 2 приложения на 11 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава содержит аналитический обзор литературы. Рассмотрены структурные, оптические и электрофизические свойства, а также методы формирования диэлектрических пленок оксида и нитрида кремния и нанокompозитов « SiO_2 с нанокристаллами на основе олова». Проведен сравнительный анализ спектров фото- и электролюминесценции светоизлучающих структур на основе слоев нитрида и оксида кремния. Проанализировано влияние методов формирования диэлектрических слоев на электрофизические и электролюминесцентные свойства структур на основе слоев нитрида и оксида кремния. Обсуждаются возможные механизмы люминесценции нанокompозитов « SiO_2 с нанокристаллами на основе олова».

Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** описаны методы формирования объектов исследования, а также используемые в работе методы диагностики и оборудование.

Однослойные (SiO_2/Si , SiN_x/Si), двухслойные ($\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$) и трехслойные ($\text{SiO}_{y2}/\text{SiN}_x/\text{SiO}_{y1}/\text{Si}$) диэлектрические пленки формировались на пластинах кремния *p*-типа марки КДБ-10. Слои SiN_x формировались методом химического осаждения из газовой фазы в реакторе пониженного давления при 850 °С. Для создания слоев оксида кремния применялись методы термического окисления кремния во влажном кислороде при 1000 °С и плазменно-химического осаждения из газовой фазы (ПХОГФ) при 350 °С. Осаждение нитрида и оксида кремния проводилось на технологическом оборудовании ОАО «Интеграл».

Для создания светоизлучающих нанокompозитов « SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 » разработаны режимы имплантации ионов олова в образцы SiO_2/Si и режимы последующих термообработок. Энергия имплантации ионов Sn^+ в слои SiO_2 толщиной 129 и 600 нм составляла 80 и 200 кэВ соответственно при флюенсах $2,5 \times 10^{16}$, 5×10^{16} и $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Имплантация проводилась при комнатной температуре. Термический отжиг проводился в кварцевой трубе при 800 и 900 °С на воздухе в течение 60 мин.

Исследование элементного состава слоев SiN_x и SiO_x , а также контроль распределения концентрации имплантированного олова по глубине слоев SiO_2 проводились методом резерфордовского обратного рассеяния (ROR) ионов

гелия с энергией 1,5 МэВ с помощью исследовательского комплекса на базе ускорителя AN-2500. Разрешение детектора составляло 15 кэВ.

Исследование морфологии диэлектрических пленок на основе слоев SiO_2 и SiN_x и измерение их толщин проводились методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на электронном микроскопе Hitachi S-4800.

Толщины слоев оксида и нитрида кремния в структурах $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{SiO}_{y2}/\text{SiN}_x/\text{SiO}_{y1}/\text{Si}$, а также спектральные зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции слоев SiN_x в диапазоне энергий 1,2–6,0 эВ исследовались методом спектральной эллипсометрии на эллипсометре HORIBA UVISEL 2.

Структурно-фазовые превращения в слоях SiO_2 , имплантированных ионами олова, исследовались методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в режимах продольного и поперечного сечения, а также методом электронной дифракции на установках Hitachi H-800 с энергией электронов 200 кэВ и JEOL JEM 2100 с энергией электронов 200 кэВ.

Для регистрации спектров ФЛ и ЭЛ диэлектрических пленок на кремниевых подложках разработан и реализован спектрометрический комплекс на базе монохроматора МДР-23 и регистрирующей системы «Спектралинк». Спектры ФЛ возбуждались He-Cd лазером (3,82 эВ). Измерение спектров ЭЛ в диапазоне энергий 1,76–3,76 эВ и электрофизических характеристик диэлектрических слоев проводилось в системе электролит – диэлектрик – полупроводник в специально разработанной электролитической ячейке. Возбуждение ЭЛ проводилось в гальваностатическом режиме при анодной поляризации подложки. В качестве катода использовался водный раствор Na_2SO_4 с концентрацией 1 моль·л⁻¹. Для возбуждения электролюминесценции, а также измерения вольт-амперных характеристик применялся измеритель параметров полупроводниковых приборов ИППП-1/6. Для получения спектров ЭЛ в величинах спектральной плотности светимости ($\text{Вт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{нм}^{-1}$) измеренные спектры ЭЛ нормированы на функцию чувствительности измерительной системы S_λ . При этом предполагалось, что яркость излучающей поверхности образцов подчиняется закону Ламберта.

В третьей главе представлены экспериментальные результаты исследований элементного состава, оптических свойств и люминесценции диэлектрических пленок на основе слоев нитрида и оксида кремния.

Суммарная толщина одно- двух- и трехслойных пленок на основе нитрида и оксида кремния, определенная из данных СЭМ и спектральной эллипсометрии, варьировалась в пределах 99–225 нм. Методами POP и спектральной эллипсометрии установлено, что увеличение параметра x в слоях SiN_x от 0,89 до 1,38 приводит к увеличению показателя преломления и

коэффициента экстинкции, а также оптической запрещенной зоны нитрида от 3,1 до 5,3 эВ.

На рисунке 1 представлены спектры ФЛ структур $\text{SiN}_{0,85}/\text{Si}$, $\text{SiN}_{1,27}/\text{Si}$, $\text{SiN}_{1,38}/\text{Si}$, $\text{SiN}_{1,17}/\text{SiO}_2(76 \text{ нм})/\text{Si}$, $\text{SiO}_{1,86}(39 \text{ нм})/\text{SiN}_{1,22}(144 \text{ нм})/\text{SiO}_{1,75}(42 \text{ нм})/\text{Si}$ и $\text{SiO}_{1,86}(31 \text{ нм})/\text{SiN}_{0,89}(67 \text{ нм})/\text{SiO}_{1,86}(40 \text{ нм})/\text{Si}$. Сигнала ФЛ образцов, не содержащих слои SiN_x , не обнаружено. Спектры ФЛ образцов со слоями SiN_x представляют собой широкую асимметричную полосу, максимум которой сдвигается в коротковолновую область от 1,8 до 3,3 эВ при увеличении параметра x от 0,85 до 1,38. Анализ спектров ФЛ позволяет сделать вывод, что свечение образцов, возбуждаемое лазером с энергией 3,82 эВ, возникает в результате электронных переходов между хвостами плотности состояний разрешенных зон или хвостами плотности состояний и энергетическими уровнями дефектов в слоях нитрида кремния.

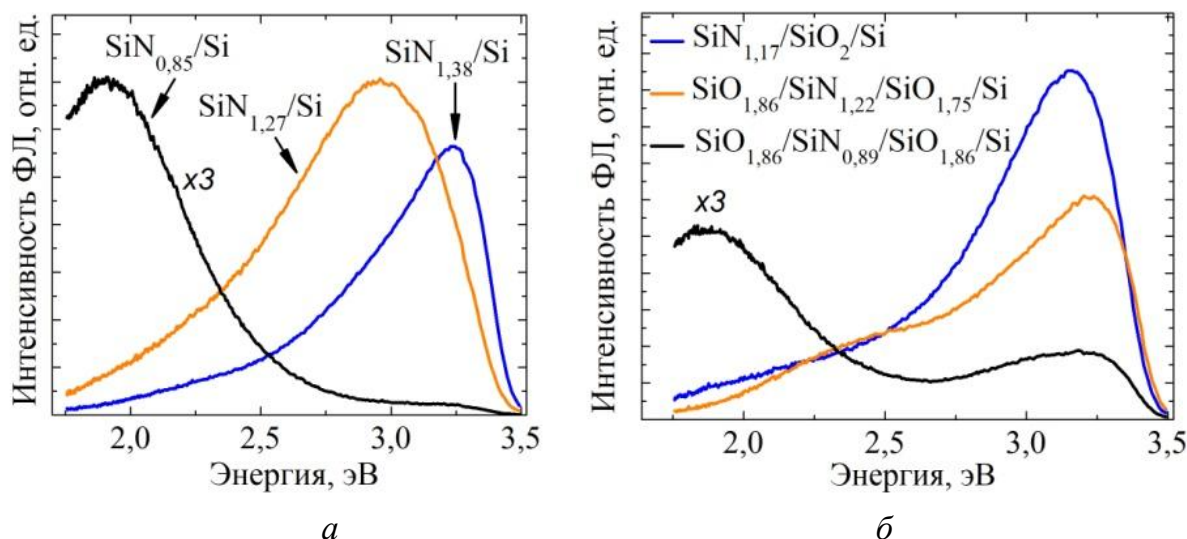


Рисунок 1 – Спектры ФЛ образцов с однослойными (а), двух- и трехслойными (б) диэлектрическими пленками

Сигнала ЭЛ образцов, не содержащих слои оксида кремния, не обнаружено. На спектрах ЭЛ образцов с термическим оксидом ($\text{SiO}_2(129 \text{ нм})/\text{Si}$ и $\text{SiN}_{1,17}/\text{SiO}_2/\text{Si}$) проявляется интенсивная полоса с максимумом при 1,9 эВ, происхождение которой обусловлено излучательной релаксацией однокоординированных атомов кислорода в слоях SiO_2 (рисунок 2, а). Спектр образца $\text{SiN}_{1,17}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ также характеризуется наличием полос ЭЛ низкой интенсивности с максимумами при 2,2, 2,7 и 3,4 эВ, природа которых объясняется свечением дефектов ($\text{O}_3\equiv\text{Si}\cdot$, $\text{O}_2=\text{Si}\cdot$) в слоях оксида кремния и оксинитрида кремния, образовавшегося на границах нитрид – оксид. Спектры ЭЛ образцов, содержащих слои оксида кремния, полученного методом ПХОГФ,

($\text{SiO}_2(107 \text{ нм})/\text{Si}$ и $\text{SiO}_{1,86}/\text{SiN}_{0,89}/\text{SiO}_{1,86}/\text{Si}$) характеризуются наличием интенсивных полос с максимумами при 1,9, 2,2 и 2,7 эВ (рисунок 2, б). Поскольку методом РОР обнаружен избыток кремния в оксидных слоях, полученных методом ПХОГФ, сделан вывод, что высокая интенсивность полос ЭЛ в области 2–3 эВ свидетельствует о высокой концентрации дефектов $\text{O}_3\equiv\text{Si}\cdot$, $\text{O}_2=\text{Si}\cdot$, Si-Si в слоях оксида кремния.

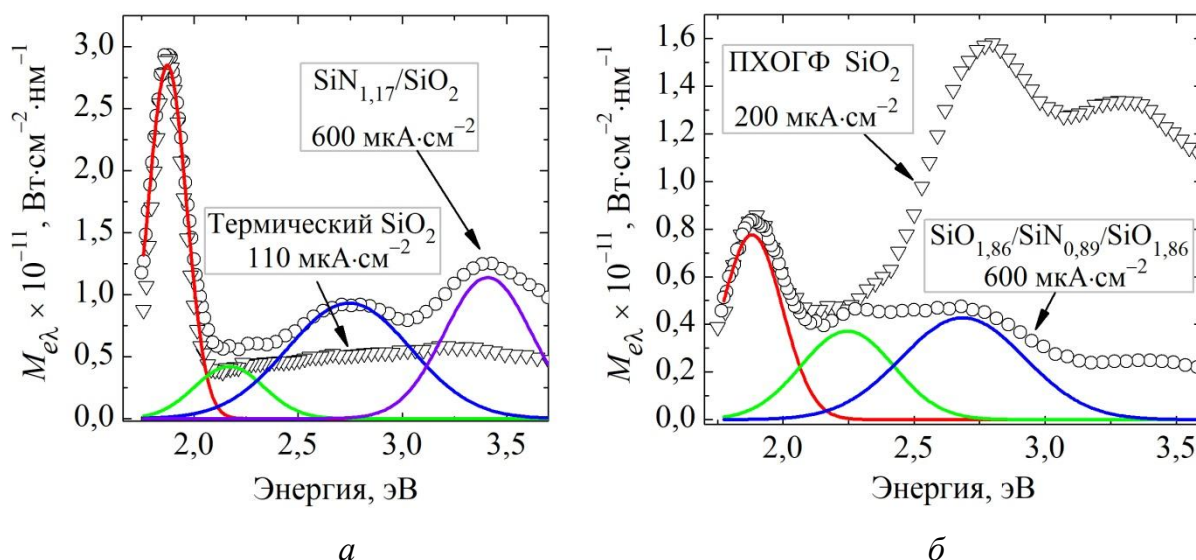


Рисунок 2 – Спектры ЭЛ образцов с термическим SiO_2 (а) и SiO_2 , полученным методом ПХОГФ (б), измеренные в диапазоне плотностей токов 110 – 600 $\text{мкА}\cdot\text{см}^{-2}$

Изучено влияние количества прошедшего через образцы заряда на спектральный состав и интенсивность полос в спектрах ЭЛ. Прохождение через образец с термическим оксидом заряда 270 $\text{мКл}\cdot\text{см}^{-2}$ при плотности тока 0,15 $\text{мА}\cdot\text{см}^{-2}$ приводит к монотонному уменьшению интенсивности полосы ЭЛ при 1,9 эВ в 2,8 раза. После прохождения заряда 300 $\text{мКл}\cdot\text{см}^{-2}$ наблюдаются самовосстанавливающиеся пробои диэлектрика. Для образцов SiO_2/Si с ПХОГФ-оксидом установлено падение интенсивности ЭЛ во всем исследуемом диапазоне энергий при прохождении заряда 100–900 $\text{мКл}\cdot\text{см}^{-2}$. Прохождение заряда 2 $\text{Кл}\cdot\text{см}^{-2}$ через образец $\text{SiN}_{1,17}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, напротив, приводит к увеличению интенсивности полосы ЭЛ при 1,9 эВ в 1,4 раза, при этом интенсивность остальных полос ЭЛ остается практически неизменной. Снижение интенсивности ЭЛ в процессе прохождения заряда более 1 $\text{Кл}\cdot\text{см}^{-2}$ при 600 $\text{мкА}\cdot\text{см}^{-2}$ через образец $\text{SiO}_{1,86}/\text{SiN}_{0,89}/\text{SiO}_{1,86}/\text{Si}$ объясняется деградацией верхнего слоя оксида. Анализ динамики изменения спектров ЭЛ в процессе протекания тока через диэлектрические слои позволил установить, что нитрид кремния, нанесенный поверх слоя оксида кремния, снижает внешний

квантовый выход ЭЛ, однако предохраняет слой SiO_2 от деградации ЭЛ и преждевременного пробоя.

В четвертой главе представлены результаты исследования структуры, ФЛ и ЭЛ, а также электрофизических свойств нанокомпозитов « SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 », созданных имплантацией ионов олова в образцы SiO_2/Si с последующим отжигом на воздухе при 800 и 900 °С в течение 60 мин.

Методом ПЭМ установлено, что имплантация ионов олова с энергиями 80 и 200 кэВ и флюенсами $(2,5, 5 \text{ и } 10) \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ приводит к формированию в слоях SiO_2 наночастиц размерами до 20 нм. В результате отжига происходит укрупнение и слияние наночастиц в приповерхностной области образцов, ниже формируется слой мелких (2–3 нм) преципитатов (рисунок 3). Имплантация флюенсами $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и последующий отжиг при 900 °С приводит к формированию на поверхности образцов слоя наночастиц толщиной ~10 нм, образованию дендритов из слившихся наночастиц в приповерхностной области имплантированных слоев и формированию нанокристаллов $\beta\text{-Sn}$ на границе раздела $\text{SiO}_2 - \text{Si}$.

Сравнение межплоскостных расстояний нанокристаллов, рассчитанных из данных ПЭМ высокого разрешения и электронной дифракции, с кристаллографической базой данных подтверждает, что наночастицы в имплантированных и отожженных образцах преимущественно состоят из кристаллической фазы SnO_2 , однако нельзя исключать вероятность образования в меньших количествах других фаз ($\beta\text{-Sn}$, SnO , SiSnO_3), а также наноструктур «ядро Sn /оболочка SnO_2 ».

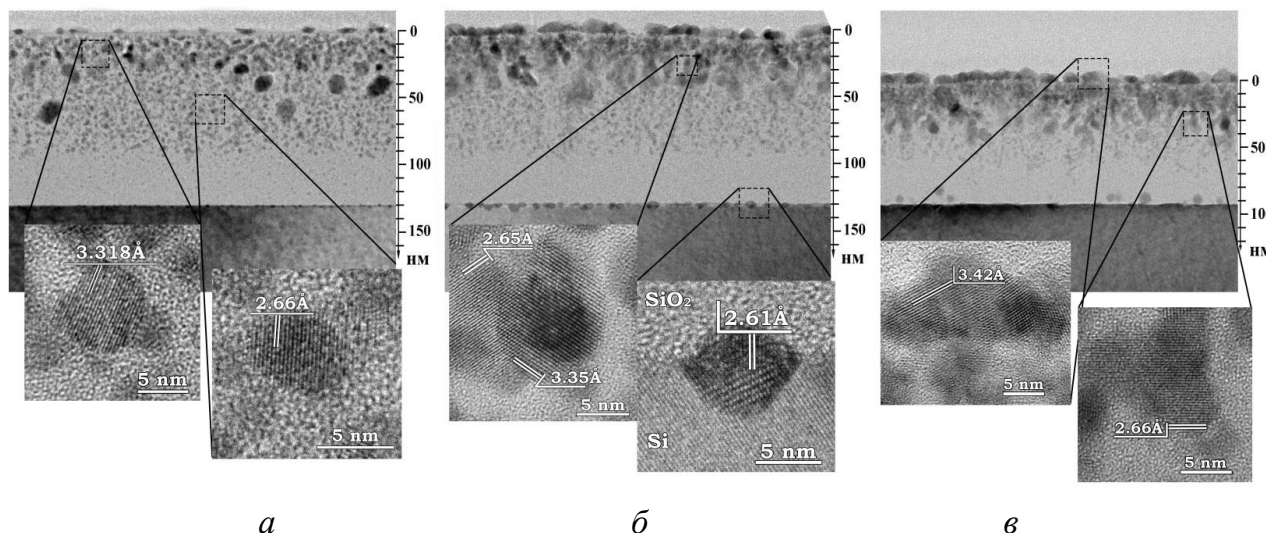


Рисунок 3 – ПЭМ-микрофотографии образцов $\text{SiO}_2(129 \text{ нм})/\text{Si}$, имплантированных ионами Sn^+ с энергией 80 кэВ и флюенсами $2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (а), $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (б) и $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (в) и отожженных при 900 °С на воздухе

Для образцов $\text{SiO}_2(600 \text{ нм})/\text{Si}$, имплантированных ионами олова с энергией 200 кэВ, характерна ФЛ низкой интенсивности в диапазоне 1,7–3,5 эВ. После отжига образцов при 800 °С на спектрах ФЛ появляются интенсивные полосы с максимумами при $\sim 3,1$ и $\sim 2,1$ эВ. Отжиг образцов при 900 °С привел к увеличению интенсивности полосы ФЛ в фиолетовой области спектра в 1,3–1,6 раза. На основе анализа полученных спектров полоса ФЛ с максимумом при 3,1 эВ объясняется рекомбинационными переходами между уровнями, расположенными вблизи разрешенных зон нанокристаллов SnO_2 .

В спектрах ФЛ образцов $\text{SiO}_2(129 \text{ нм})/\text{Si}$, имплантированных ионами олова с энергией 80 кэВ и отожженных при 900 °С, доминирует фиолетовая полоса с максимумом при $\sim 3,2$ эВ (рисунок 4, а). Уменьшение интенсивности полосы в фиолетовой области на спектрах ФЛ по мере увеличения флюенса имплантации образцов обусловлено формированием обусловленных дефектами центров безызлучательной рекомбинации в матрице оксида кремния. Имплантация ионов Sn^+ и последующие термообработки образцов SiO_2/Si привели к увеличению квантового выхода ЭЛ на 2–3 порядка величины. Корреляция между «фиолетовыми» полосами в спектрах ФЛ и ЭЛ (рисунок 4) позволяет сделать вывод, что ЭЛ имплантированных слоев обусловлена теми же центрами свечения, что и фотолюминесценция.

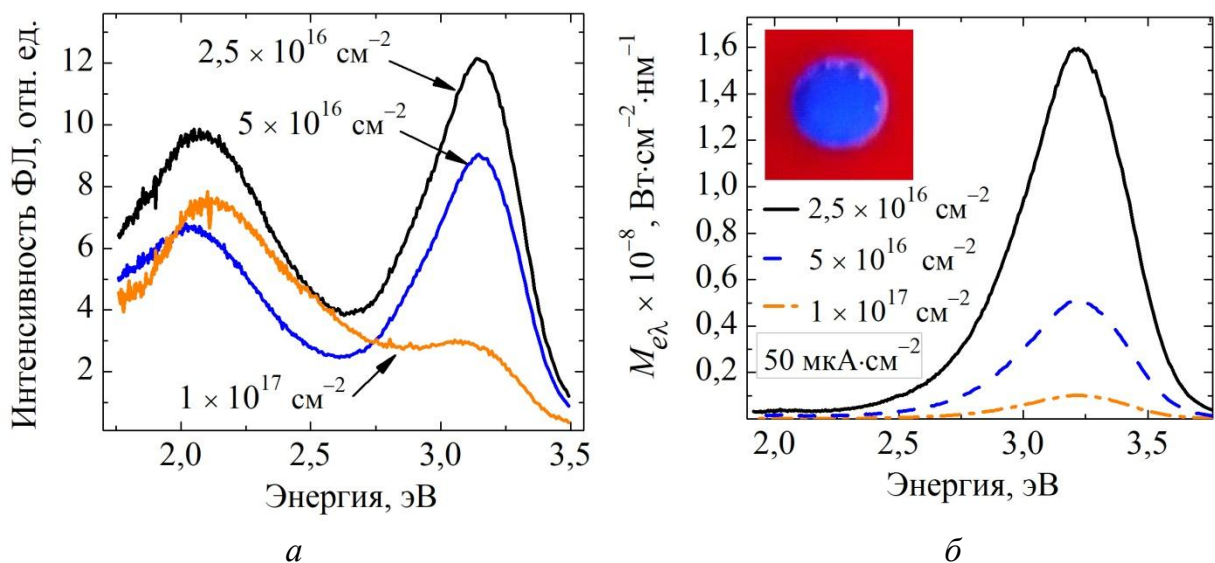


Рисунок 4 – Спектры ФЛ (а) и ЭЛ (б) образцов $\text{SiO}_2(129 \text{ нм})/\text{Si}$, имплантированных ионами Sn^+ с энергией 80 кэВ и флюенсами 1×10^{17} , 5×10^{16} и $2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и отожженных при 900 °С

Проведен сравнительный анализ вольт-амперных характеристик, а также зависимостей внешнего квантового выхода ЭЛ от плотности протекающего через нанокomпозиты тока. Внешний квантовый выход η_k определялся

соотношением количества испущенных поверхностью образца фотонов (N_p) к количеству прошедших через образец электронов (N_e):

$$\eta_k = \frac{N_p}{N_e} = \frac{1}{jhc} \int M_{e\lambda} \lambda d\lambda,$$

где j – плотность протекающего через образец тока;

h – постоянная Планка;

c – скорость света;

$M_{e\lambda}$ – спектральная плотность энергетической светимости поверхности;

λ – длина волны.

Из рисунка 5 видно, что увеличение флюенса имплантации привело к увеличению проводимости имплантированных и отожженных слоев, а также к уменьшению внешнего квантового выхода ЭЛ. Ток, протекающий в области слабых полей ($F < 1,5 \text{ МВ} \cdot \text{см}^{-1}$), имеет линейную зависимость $j \sim (F - F_0)$, обусловлен переносом носителей заряда по глубоким локализованным состояниям в SiO_2 и не приводит к возникновению ЭЛ (рисунок 5, а). Установлено, что концентрация глубоких локализованных состояний увеличивается с увеличением флюенса имплантации. В области полей $1,5\text{--}5 \text{ МВ} \cdot \text{см}^{-1}$ ВАХ аппроксимированы моделью токов, ограниченных пространственным зарядом.

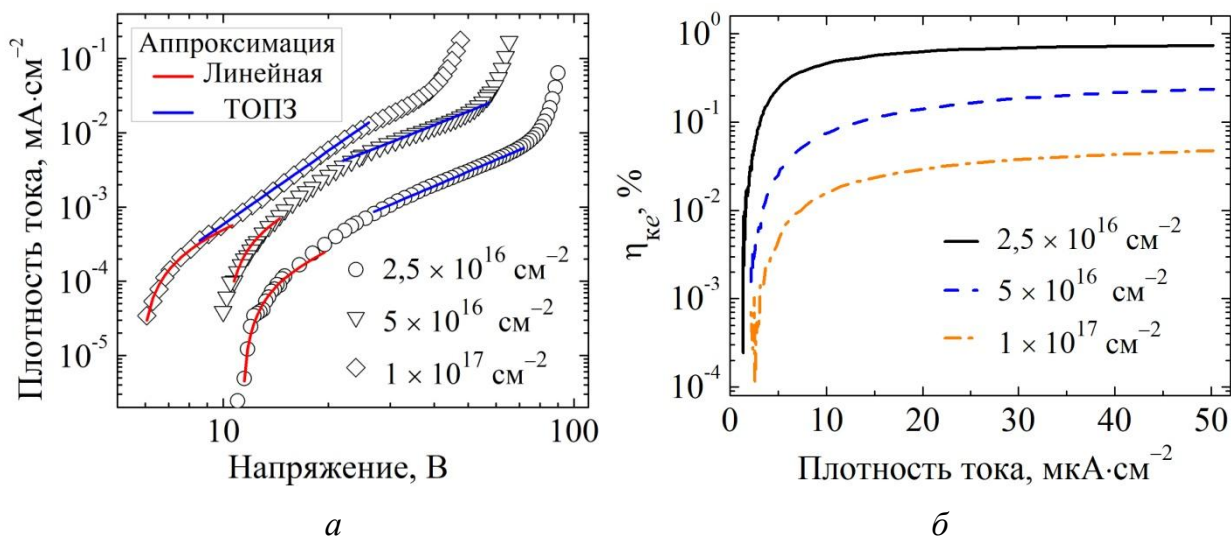


Рисунок 5 – Вольт-амперные характеристики (а) и зависимости внешнего квантового выхода от плотности тока (б) для образцов $\text{SiO}_2(129 \text{ нм})/\text{Si}$, имплантированных ионами Sn^+ и отожженных при 900°C на воздухе

Установлено, что внешний квантовый выход увеличивается с увеличением плотности тока от 1 до $50 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ и с уменьшением флюенса имплантации от 1×10^{17} до $2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Максимальное значение η_k , полученное при $j = 50 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$, составляет $\sim 0,7\%$ для образца,

имплантированного флюенсом $2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Крайне низкие значения квантового выхода при плотностях тока менее $2 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ свидетельствуют о том, что носители заряда, переносимые по глубоким уровням, образованным радиационными дефектами в SiO_2 , не участвуют в процессах возбуждения ЭЛ. Если концентрация дефектов высока, а расстояние между ними мало, может формироваться проводящий канал, по которому протекает ток, «шунтирующий» люминесцентные центры. Таким образом, электрический ток, протекающий через светоизлучающий слой, можно разделить на две компоненты: ток, участвующий в процессах возбуждения ЭЛ, и шунтирующий ток, протекающий по дефектным состояниям в имплантированном SiO_2 . Увеличение проводимости нанокompозитов и уменьшение квантового выхода по мере увеличения флюенса имплантации объясняется увеличением концентрации дефектов, участвующих в процессах протекания шунтирующего тока.

Для выявления механизмов переноса носителей заряда, участвующих в процессах возбуждения полосы ЭЛ с максимумом при 3,2 эВ, исследованы зависимости энергетической светимости от средней напряженности электрического поля $M_e(F)$ (рисунок 6). Анализ зависимостей $M_e(F)$ показал, что транспорт носителей заряда, участвующих в процессах возбуждения ЭЛ, описывается как эмиссией Пула – Френкеля, так и механизмом туннелирования носителей заряда между ловушками в SiO_2 . Путем аппроксимации зависимостей $M_e(F)$ законом Пула – Френкеля установлено, что диэлектрическая проницаемость нанокompозитов увеличивается от 6,4 до 7,9 при увеличении флюенса имплантации от $2,5 \times 10^{16}$ до $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$, что объясняется увеличением концентрации атомов Sn в имплантированных слоях.

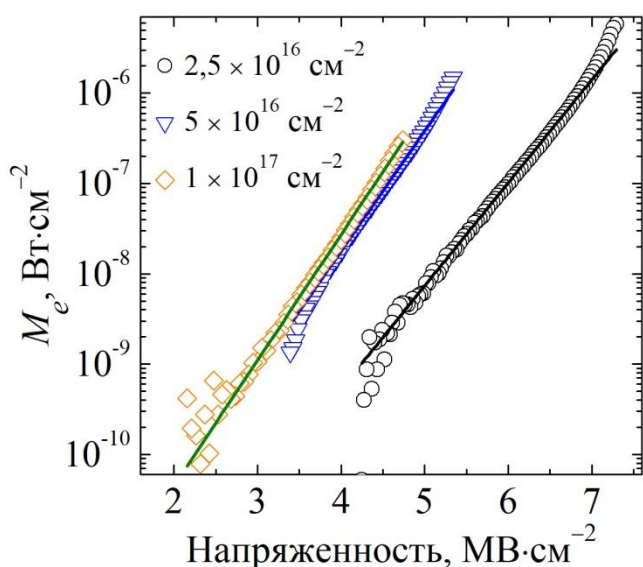


Рисунок 6 – Характеристики $M_e(F)$, построенные в полулогарифмических координатах для образцов $\text{SiO}_2(129 \text{ нм})/\text{Si}$, имплантированных ионами Sn^+ с энергией 80 кэВ флюенсами 1×10^{17} , 5×10^{16} и $2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и отожженных при 900 °С

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Методами резерфордовского обратного рассеяния, спектральной эллипсометрии и фотолюминесценции установлено, что увеличение концентрации избыточных атомов кремния от 4 до 18 % в слоях SiN_x диэлектрических пленок $\text{SiN}_{1,17}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, $\text{SiO}_{1,86}/\text{SiN}_{1,22}/\text{SiO}_{1,75}/\text{Si}$ и $\text{SiO}_{1,86}/\text{SiN}_{0,89}/\text{SiO}_{1,86}/\text{Si}$ приводит к уменьшению ширины оптической запрещенной зоны нитрида кремния от 5,2 до 3,1 эВ и смещению максимума полосы ФЛ с 3,3 до 1,8 эВ [1–А; 12–А; 20–А].

2. Сравнительный анализ спектров ФЛ и ЭЛ пленок на основе слоев оксида и нитрида кремния ($\text{SiN}_{1,17}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, $\text{SiO}_{1,86}/\text{SiN}_{1,22}/\text{SiO}_{1,75}/\text{Si}$ и $\text{SiO}_{1,86}/\text{SiN}_{0,89}/\text{SiO}_{1,86}/\text{Si}$) позволил установить, что ФЛ, возбуждаемая лазером с энергией квантов 3,82 эВ, главным образом обусловлена свечением слоев нитрида кремния, а ЭЛ обусловлена свечением слоев оксида и оксинитрида кремния, образовавшегося на границах оксид – нитрид. Наблюдаемая ФЛ объясняется электронными переходами между хвостами плотности состояний разрешенных зон или хвостами плотности состояний и энергетическими уровнями дефектов в слоях SiN_x . Спектры ЭЛ диэлектрических пленок характеризуются полосами с максимумами при 1,9, 2,2 и 2,7 эВ, обусловленными люминесценцией дефектов в оксиде и оксинитриде кремния [2–А; 6–А; 9–А; 11–А; 13–А; 14–А; 19–А].

3. Установлено, что при прохождении через образец SiO_2 (термический)/Si заряда $270 \text{ мКл} \cdot \text{см}^{-2}$ при плотности тока $0,15 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$ происходит уменьшение интенсивности полосы ЭЛ при 1,9 эВ в 2,8 раза. Также установлено, что при прохождении заряда до $2 \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}$ через образец с двухслойной пленкой ($\text{SiN}_{1,17}/\text{SiO}_2$) наблюдается увеличение интенсивности полосы ЭЛ при 1,9 эВ в 1,4 раза, при этом интенсивность полос ЭЛ с максимумами при 2,2 и 2,7 эВ практически не изменяется. На основании полученных закономерностей изменения интенсивности полос ЭЛ в процессе протекания тока через образцы установлено что, нитрид кремния, нанесенный поверх слоя оксида кремния, снижает внешний квантовый выход ЭЛ, однако предохраняет слой оксида от деградации ЭЛ [5–А; 14–А; 15–А].

4. Установлено, что имплантация ионов олова с энергиями 80 и 200 кэВ и флюенсами $(2,5, 5 \text{ и } 10) \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в слой SiO_2 на кремниевых подложках и последующие отжиги образцов на воздухе при 800 и 900 °С приводят к формированию нанопреципитатов в имплантированных слоях, которые по данным ПЭМ высокого разрешения и электронной дифракции преимущественно состоят из кристаллической фазы SnO_2 [3–А; 4–А].

5. Спектры ФЛ нанокompозитов « SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 », сформированных методом имплантации ионов олова в SiO_2/Si и последующими

термообработками, характеризуются широкими полосами с максимумами в зеленой (2,0–2,3 эВ) и фиолетовой (3,1–3,2 эВ) области спектра. Природа наиболее интенсивной полосы ФЛ с максимумом при ~3,1 эВ объясняется электронными переходами между уровнями, расположенными вблизи разрешенных зон нанокристаллов SnO₂. Интенсивность полосы при ~3,1 эВ увеличивается в 1,3–1,6 раза при увеличении температуры отжига от 800 до 900 °С [3–А; 4–А; 10–А].

6. В спектрах ЭЛ образцов SiO₂/Si, имплантированных ионами олова с энергией 80 кэВ и отожженных при 900 °С, доминирует фиолетовая полоса с максимумом при 3,2 эВ, которая обусловлена теми же центрами свечения, что и фотолюминесценция. Установлено, что внешний квантовый выход ЭЛ нанокompозитов «SiO₂ с нанокристаллами SnO₂» увеличивается с увеличением плотности тока от 1 до 50 мкА·см⁻² и уменьшением флюенса имплантации от 1×10^{17} до $2,5 \times 10^{16}$ см⁻². Максимальное значение квантового выхода, полученное при 50 мкА·см⁻², составляет ~0,7 % для образца, имплантированного флюенсом $2,5 \times 10^{16}$ см⁻² [7–А; 8–А; 17–А; 21–А].

7. На основе анализа ВАХ нанокompозитов «SiO₂ с нанокристаллами SnO₂», установлено, что в области полей менее 1,5 МВ·см⁻¹ ток обусловлен протеканием носителей заряда по глубоким уровням в запрещенной зоне SiO₂ и не приводит к возбуждению ЭЛ. Увеличение напряженности электрического поля приводит к появлению тока носителей заряда, участвующих в процессах возбуждения ЭЛ. Сравнительный анализ ВАХ и зависимостей квантового выхода ЭЛ от плотности тока позволил установить, что уменьшение квантового выхода с увеличением флюенса имплантации от $2,5 \times 10^{16}$ до 1×10^{17} см⁻² обусловлено снижением тока носителей заряда, участвующих в процессах возбуждения ЭЛ, в результате возрастания концентрации радиационных дефектов в имплантированных слоях. [8–А; 16 – 18–А; 21–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты представляют практический интерес для разработки в рамках существующей кремниевой технологии светоизлучающих приборов нового поколения на основе пленок оксида и нитрида кремния. Полученные научно-практические результаты представляют интерес для ряда исследовательских лабораторий и промышленных предприятий, в том числе и в Республике Беларусь: ОАО «Интеграл», ОАО «Планар», ОАО «Минский НИИ радиоматериалов». Результаты исследования внедрены в образовательный процесс на факультете радиофизики и компьютерных технологий БГУ (получено 2 акта о практическом использовании результатов исследования в учебном процессе). Получен акт о практическом использовании результатов научно-технического проекта на предприятии ОАО «Интеграл».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. Blue and red light-emitting non-stoichiometric silicon nitride-based structures / I. A. Romanov, I. N. Parkhomenko, L. A. Vlasukova, F. F. Komarov, N. S. Kovalchuk, O. V. Milchanin, M. A. Makhavikou, A. V. Mudryi, V. D. Zhivulko, Hong-Liang Lu // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series. – 2018. – Vol. 54, № 3. – P. 360–368. – DOI: 10.29235/1561-2430-2018-54-3-360-368.

2–А. Фото-и электролюминесценция структур оксид-нитрид-оксид-кремний для применения в кремниевой оптоэлектронике / И. А. Романов, Л. А. Власукова, Ф. Ф. Комаров, И. Н. Пархоменко, Н. С. Ковальчук, М. А. Моховиков, А. В. Мудрый, О. В. Мильчанин // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 5. – С. 546–554. – DOI: 10.29235/1561-8323-2018-62-5-546-554.

3–А. Структура, фото- и электролюминесценция диоксида кремния, имплантированного высокими флюенсами ионов олова / И. А. Романов, М. А. Моховиков, Ф. Ф. Комаров, О. В. Мильчанин, И. Н. Пархоменко, Л. А. Власукова, Э. Вендлер, А. В. Мудрый, В. Д. Живулько // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2018. – № 3. – С. 54–64.

4–А. Structural evolution and photoluminescence of SiO₂ layers with Sn nanoclusters formed by ion implantation / I. Romanov, F. Komarov, O. Milchanin, L. Vlasukova, I. Parkhomenko, M. Makhavikou, E. Wendler, A. Mudryi, A. Togambayeva // Journal of Nanomaterials. – 2019. – Vol. 2019 – P. 1–9. – DOI: 10.1155/2019/9486745.

5–А. Процессы деградации электролюминесценции светоизлучающих структур на основе тонких пленок оксида и нитрида кремния / И. А. Романов, Ф. Ф. Комаров, Л. А. Власукова, И. Н. Пархоменко, Н. С. Ковальчук // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 2. – С. 158–167. – DOI: 10.29235/1561-8323-2021-65-2-158-167.

6–А. Электролюминесценция пленок SiO₂ на Si, полученных термическим окислением и плазмохимическим осаждением / И. А. Романов, Н. С. Ковальчук, Л. А. Власукова, И. Н. Пархоменко, В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, Д. В. Шестовский, С. А. Демидович // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2021. – № 3. – С. 26–31. – DOI: 10.33581/2520-2243-2021-3-26-31.

7–А. Fluence effect on photo-and electroluminescence of silica layers implanted with Sn^+ ions / I. Romanov, F. Komarov, I. Parkhomenko, L. Vlasukova, M. Makhavikou, O. Milchanin, E. Wendler, A. van Vuuren, J. Neethling // *Materials Letters*. – 2022. – Vol. 308, pt. 1. – P. 1–4. – DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131070.

8–А. Intense violet electroluminescence of thin SiO_2 layers with SnO_2 nanocrystals / I. Romanov, I. Parkhomenko, L. Vlasukova, E. Wendler, F. Komarov // *Results in Optics*. – 2024. – Vol. 17. – P. 1–7. – DOI: 10.1016/j.rio.2024.100750.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

9–А. Влияние термического и лазерного отжига на люминесценцию тонких пленок нитрида кремния с избытком кремния / И. Н. Пархоменко, И. А. Романов, Ф. В. Потемкин, Д. В. Шулейко, Ф. В. Кашаев, Т. Koltunowicz // *Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 12-й Междунар. конф., Минск, 19–22 сент. 2017 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Углов (отв. ред.) [и др.]. – Мн., 2017. – С. 266–268.*

10–А. Светоизлучающие свойства пленок оксида кремния, имплантированных оловом / И. А. Романов, И. Н. Пархоменко, Л. А. Власукова, Ф. Ф. Комаров, О. В. Мильчанин, М. А. Моховиков, А. В. Мудрый, В. Д. Живулько, Е. Wendler // *Актуальные проблемы физики твердого тела : материалы VIII Междунар. науч. конф., Минск, 24–28 сент. 2018 г. : в 3 т. / Науч.-практ. центр Нац. акад. Беларуси по материаловедению ; редкол.: Н. М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Мн., 2018. – Т. 3. – С. 89–91.*

11–А. Установка для измерения спектров электролюминесценции диэлектрических структур на основе оксида и нитрида кремния в системе электролит-диэлектрик-полупроводник / И. А. Романов, Ф. Ф. Комаров, Л. А. Власукова, И. Н. Пархоменко // *Приборостроение-2018 : материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф., 14–16 нояб. 2018 г., Минск / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Мн., 2018. – С. 352–353.*

12–А. Photoluminescence of $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ structures with off-stoichiometric silicon nitride layers / I. A. Romanov, L. A. Vlasukova, I. N. Parkhomenko, F. F. Komarov, O. V. Milchanin, M. A. Makhavikou, A. V. Mudryi, V. D. Zhivulko, N. S. Kovalchuk, N. A. Krekoten, H.-L. Lu // *Proceedings of the 2018 IEEE 8th International conference on nanomaterials : applications and properties (NAP-2018) : Zatoka, Ukraine, Sept. 9–14, 2018 / Sumy State Univ. ; ed.: A. D. Pogrebnjak, V. Novosad. – Sumy, 2018. – Pt. 3. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/NAP.2018.8915123.*

13–А. Фото- и электролюминесценция структур оксид-нитрид-оксид-кремний для применений в кремниевой оптоэлектронике / И. А. Романов, Ф. Ф. Комаров, Л. А. Власукова, Н. С. Ковальчук, А. В. Мудрый,

М. А. Моховиков // I международная научно-техническая конференция «Опто-, микро- и СВЧ-электроника – 2018», 22–26 октября 2018 года, г. Минск, Беларусь : сб. науч. ст. / [под ред. Н. С. Казака, А. С. Чижа, В. В. Малютиной-Бронской]. – Мн., 2018. – С. 328–331.

14–А. Photo-and electroluminescence of layered structures based on silicon oxide and nitride films / I. Romanov, F. Komarov, I. Parkhomenko, L. Vlasukova, N. Kovalchuk, A. Mudryi, V. Zhivulko // Microstructure and properties of micro- and nanoscale materials, films, and coatings (NAP 2019) : sel. art. from the intern. conf. on Nanomaterials: applications and properties, Odesa, Ukraine, 15–20 Sept. 2019 / Sumy State Univ. ; ed.: A. D. Pogrebnjak, O. Bondar. – [S. l.], 2020. – Chap. 35. – P. 361–366. – DOI: 10.1007/978-981-15-1742-6_35.

15–А. Light-emitting compositions on the base of SiO_2 and SiN_x films on Si: electroluminescence and its degradation / I. Romanov, L. Vlasukova, F. Komarov, I. Parkhomenko, D. Zhigulin, N. Kovalchuk // Actual problems of solid state physics = Актуальные проблемы физики твердого тела : proc. of the IX Intern. Sci. Conf., 22–26 Nov. 2021, Minsk, Belarus : in two books / [ed.: V. M. Fedosyuk (chairman) [et al.] ; The Nat. Acad. of Sciences of Belarus, Scientific and Practical Research Centre of the Nat. Acad. of Sciences of Belarus (Inst. of Solid State and Semiconductor Physics). – Minsk, 2021. – Bk. 2. – P. 202–206.

16–А. Романов, И. А. Электрофизические свойства светоизлучающих структур на основе SiO_2 , имплантированного высокими дозами ионов олова / И. А. Романов, Ф. Ф. Комаров // Квантовая электроника : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–26 нояб. 2021 г. / Белорус. гос. ун-т [и др.] ; редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.), А. А. Афоненко, А. В. Баркова. – Мн., 2021. – С. 134–137.

17–А. Фото-и электролюминесценция слоев SiO_2 , имплантированных высокими дозами ионов олова / И. А. Романов, Ф. Ф. Комаров, Л. А. Власукова, И. Н. Пархоменко // Квантовая электроника : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–26 нояб. 2021 г. / Белорус. гос. ун-т [и др.] ; редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.), А. А. Афоненко, А. В. Баркова. – Мн., 2021. – С. 130–133.

18–А. Романов, И. А. Влияние дозы имплантации на электрофизические свойства диоксида кремния, имплантированного высокими дозами ионов олова / И. А. Романов, Ф. Ф. Комаров, E. Wendler // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 15-й Междунар. конф., Минск, 26–29 сент. 2023 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. М. Анищик [и др.]. – Мн., 2023. – С. 301–303.

19–А. Влияние интерференции света на внешний квантовый выход электролюминесценции системы «кварц-электролит- SiO_2 -Si» / И. А. Романов, Ф. Ф. Комаров, Л. А. Власукова, И. Н. Пархоменко // Квантовая электроника :

материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–23 нояб. 2023 г. / Белорус. гос. ун-т [и др.] ; редкол. : М. М. Кугейко (гл. ред.), А. А. Афоненко, А. В. Баркова. – Мн., 2023. – С. 257–261.

Тезисы докладов на конференциях

20–А. Light emitting layered structure based on silicon nitride with different stoichiometry / I. A. Romanov, I. N. Parkhomenko, F. F. Komarov, L. A. Vlasukova, O. V. Milchanin, M. A. Makhavikou, A. V. Mudryi, V. D. Zhivulko, N. S. Kovalchuk // Radiation physics and chemistry of condensed matter : proc. of the 18th Intern. Conf., Tomsk, Russia, 16–22 Sept. 2018 / Inst. of High-Technology Physics, Tomsk Polytechnic Univ. ; ed.: A. Yakovlev (chairman) [et al.]. – Tomsk, 2018. – P. 467.

21–А. Electroluminescence and charge transport of SiO₂ layers with ion-beam synthesized SnO₂ nanocrystals / I. Romanov, L. Vlasukova, I. Parkhomenko, E. Wendler, F. Komarov // ICDIM 2024 : book of abstr. 21st Intern. conf. on Defects in insulating materials, Astana, Kazakhstan, 19–23 Aug. 2024 / L. N. Gumilyov Eurasian Nat. Univ. ; ed.: A. Dauletbekova, A. I. Popov. – Astana, 2024. – P.147.

РЭЗІЮМЭ

Раманаў Іван Аляксандравіч

СТРУКТУРА І ЛЮМІНЕСЦЭНТНЫЯ ЎЛАСЦІВАСЦІ ДЫЭЛЕКТРЫЧНЫХ ПЛЁНАК НА АСНОВЕ СЛАЁЎ АКСІДУ І НІТРЫДУ КРЭМНІЮ І НАНАКАМПАЗІТАЎ «SiO₂ З НАНАКРЫШТАЛЯМІ SnO₂»

Ключавыя словы: дыэлектрычныя плёнкi на аснове нітрыду і аксiду крэмнію, нанакампазіты SiO₂ з нанакрышталямі SnO₂, склад, структура, фоталюмiнесцэнцыя, электралюмiнесцэнцыя, квантавы выхад

Мэта працы: усталюванне заканамернасцяў змены люмiнесцэнтных і электрафізічных уласцівасцяў дыэлектрычных плёнак на аснове слаёў нітрыду і аксiду крэмнію, а таксама слаёў аксiду крэмнію, iмплантаваных iёнамі волава, у залежнасці ад iх элементнага і структурна-фазавага складу.

Метады даследавання: спектраскапія рэзерфордаўскага зваротнага расейвання, сканавальная электронная мікраскапія, прасвечваючая электронная мікраскапія і электронная дыфракцыя, спектральная эліпсаметрыя, фота- і электралюмiнесцэнцыя, вымярэнне вольт-амперных характарыстык.

Атрыманыя вынікі і iх навізна: упершыню праведзена даследаванне электралюмiнесцэнцыі двух- і трохслаёвых плёнак на аснове слаёў нестэхіяметрычнага нітрыду і аксiду крэмнію. Паказана, што фоталюмiнесцэнцыя кампазіцый SiN_x/SiO₂/Si і SiO₂/SiN_x/SiO₂/Si, якая ўзбуджаецца лазерам з энергіяй квантаў 3,82 эВ, абумоўлена электроннымі пераходамі ў сляях SiN_x, а электралюмiнесцэнцыя (ЭЛ) абумоўлена дэфектнай люмiнесцэнцыяй слаёў аксiду крэмнію.

Сiнтэзавана структура з нанакрышталямі SnO₂ у плёнцы SiO₂ на Si, iнтэнсіўна выпраменьваючая ў фіялетавай вобласці спектру (3,2 эВ) як пры фота-, так і пры электрычным ўзбуджэнні. Паказана, што iмплантацыя iёнаў Sn⁺ з энергіяй 80 кэВ і флюенсам $2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ з наступным адпалам на паветры (900 °С, 60 хв) прыводзіць да павелічэння знешняга квантавага выхаду ЭЛ плёнкi дыаксiду крэмнію на тры парадку.

Праведзены аналіз вольт-амперных характарыстык, залежнасцяў знешняга квантавага выхаду ЭЛ ад шчыльнасці току. Устаноўлена, што памяншэнне квантавага выхаду з павелічэннем флюенса iмплантацыі ад $2,5 \times 10^{16}$ да $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ абумоўлена зніжэннем току носьбітаў зарада, якія ўдзельнічаюць у працэсах ўзбуджэння ЭЛ за кошт узрастання канцэнтрацыі радыяцыйных дэфектаў у iмплантаваных сляях.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць ужывання: атрыманыя вынікі ўяўляюць практычную цікавасць для распрацоўкі ў рамках iснуючай крамянёвай тэхналогіі святловыпрамяняльных прыбораў новага пакалення на аснове плёнак аксiду і нітрыду крэмнію.

РЕЗЮМЕ

Романов Иван Александрович

СТРУКТУРА И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ СЛОЕВ ОКСИДА И НИТРИДА КРЕМНИЯ И НАНОКОМПОЗИТОВ «SiO₂ С НАНОКРИСТАЛЛАМИ SnO₂»

Ключевые слова: диэлектрические пленки на основе нитрида и оксида кремния, наноконпозиты SiO₂ с нанокристаллами SnO₂, состав, структура, фотолюминесценция, электролюминесценция, квантовый выход

Цель работы: установление закономерностей изменения люминесцентных и электрофизических свойств диэлектрических пленок на основе слоев нитрида и оксида кремния, а также слоев оксида кремния, имплантированных ионами олова, в зависимости от их элементного и структурно-фазового состава.

Методы исследования: спектроскопия резерфордовского обратного рассеяния, сканирующая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия и электронная дифракция, спектральная эллипсометрия, фото- и электролюминесценция, измерение вольт-амперных характеристик.

Полученные результаты и их новизна: впервые проведено исследование электролюминесценции двух- и трехслойных пленок на основе слоев нестехиометрического нитрида и оксида кремния. Показано, что фотолюминесценция композиций SiN_x/SiO₂/Si и SiO₂/SiN_x/SiO₂/Si, возбуждаемая лазером с энергией квантов 3,82 эВ, обусловлена электронными переходами в слоях SiN_x, а электролюминесценция (ЭЛ) обусловлена свечением дефектов в слоях оксида кремния.

Синтезирована структура с нанокристаллами SnO₂ в пленке SiO₂ на Si, интенсивно излучающая в фиолетовой области спектра (3,2 эВ) как при фото-, так и при электрическом возбуждении. Показано, что имплантация ионов Sn⁺ с энергией 80 кэВ и флюенсом $2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ с последующим отжигом на воздухе (900 °С, 60 мин) приводит к увеличению внешнего квантового выхода ЭЛ пленки диоксида кремния на три порядка. Проведен анализ вольт-амперных характеристик, зависимостей внешнего квантового выхода ЭЛ от плотности тока. Установлено, что уменьшение квантового выхода с увеличением флюенса имплантации от $2,5 \times 10^{16}$ до $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ обусловлено снижением тока носителей заряда, участвующих в процессах возбуждения ЭЛ, вследствие возрастания концентрации радиационных дефектов в имплантированных слоях.

Рекомендации по использованию и область применения: полученные результаты представляют практический интерес для разработки в рамках существующей кремниевой технологии светоизлучающих приборов нового поколения на основе пленок оксида и нитрида кремния.

SUMMARY

Ivan A. Romanov

STRUCTURE AND LUMINESCENT PROPERTIES OF DIELECTRIC FILMS BASED ON SILICON OXIDE AND NITRIDE LAYERS AND NANOCOMPOSITES «SiO₂ WITH SnO₂ NANOCRYSTALS»

Keywords: dielectric films based on silicon nitride and oxide, SiO₂ nanocomposites with SnO₂ nanocrystals, composition, structure, photoluminescence, electroluminescence, quantum yield

The aim of the work is to establish relationships between the luminescent and electrophysical properties of dielectric films based on silicon nitride and oxide layers, as well as silicon oxide layers implanted with tin ions and their elemental and structural-phase composition.

Methods of investigation: Rutherford backscattering, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy and electron diffraction, spectral ellipsometry, photo- and electroluminescence, measurement of current-voltage characteristics.

The obtained results and their novelty: the electroluminescence of two- and three-layer films based on non-stoichiometric silicon nitride and oxide layers has been studied for the first time. It has been shown that the photoluminescence of SiN_x/SiO₂/Si and SiO₂/SiN_x/SiO₂/Si compositions excited by a laser with a quantum energy of 3.82 eV is due to electron transitions in the SiN_x layers, while the electroluminescence (EL) is due to defect luminescence of the silicon oxide layers.

A structure with SnO₂ nanocrystals in a SiO₂ film on Si has been synthesized, intensely emitting in the violet region of the spectrum (3.2 eV) under both photo- and electrical excitation. It is shown that implantation of Sn ions with an energy of 80 keV and a fluence of $2.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ followed by annealing in air (900 °C, 60 min) leads to an increase in the external quantum yield of EL of the silicon dioxide film by three orders of magnitude. The current-voltage characteristics, the dependences of the external quantum yield of EL on the current density have been analyzed. It was established that the decrease in the quantum yield with an increase in the implantation fluence from 2.5×10^{16} to $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ was due to a decrease in the current of charge carriers participating in the EL excitation processes caused by an increase in the concentration of radiation defects in the implanted layers.

Recommendations for use and scope of application: the obtained results are of practical interest for the development of new-generation LEDs on the base of silicon oxide and nitride films within the current silicon technology.



Научное издание

РОМАНОВ
Иван Александрович

**СТРУКТУРА И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ СЛОЕВ ОКСИДА
И НИТРИДА КРЕМНИЯ И НАНОКОМПОЗИТОВ
«SiO₂ С НАНОКРИСТАЛЛАМИ SnO₂»**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния