

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу РОМАНОВА Ивана Александровича

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

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которой она представлена к защите.

Объектом исследования диссертационной работы Романова Ивана Александровича «СТРУКТУРА И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ СЛОЕВ ОКСИДА И НИТРИДА КРЕМНИЯ И НАНОКОМПОЗИТОВ «SiO₂ С НАНОКРИСТАЛЛАМИ SnO₂» были пластины кремния с диэлектрическими пленками на основе слоев нитрида и оксида кремния, а также пластины кремния с термически выращенными слоями диоксида кремния, имплантированными различными флюенсами ионов олова; предметом исследования являлись структурные, люминесцентные и электрофизические свойства пленок на основе слоев оксида и нитрида кремния и нанокomпозитов, сформированных имплантацией ионов олова в слои оксида кремния с последующими термообработками. В совокупности с полученными результатами, отраженными в выводах и выносимых на защиту положениях, это позволяет утверждать, что диссертационная работа соответствует отрасли физико-математических наук, специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния. Представленные в работе результаты входят в области исследований, предусмотренные паспортом данной специальности (п.2 Элементный и фазовый состав, структура (строение) и физические свойства конденсированных сред (систем); п.5 Изменение состава, структуры и свойств конденсированных сред под влиянием внешних воздействий).

2. Актуальность темы диссертации

Актуальность исследования пленочных материалов и структур на их основе, разработка и усовершенствование методов их формирования важны как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения. В настоящее время активно ведутся разработки оптоэлектронных компонентов на базе кремниевой технологии. Для создания элементов кремниевой оптоэлектроники перспективными и экономически выгодными материалами являются кремний, оксид (SiO_x) и нитрид (SiN_x) кремния. Получение светоизлучающих структур на базе кремниевой технологии дает возможность реализовать оптоэлектронную развязку электрических цепей на одном кристалле, что позволит уменьшить размеры и стоимость разрабатываемых микроэлектронных приборов. Благодаря своим люминесцентным свойствам тонкие слои наноструктурированного кремния, а также оксида и нитрида кремния считаются перспективными материалами для создания светоизлучающих устройств. Следует отметить, что нанокomпозиты «SiO₂ с нанокристаллами SnO₂» привлекают внимание исследователей, как материал, излучающих свет в фиолетовой области спектра (300–450 нм), для элементов кремниевой оптоэлектроники. Хорошо известно, что для исследования светоизлучающих структур широко применяется метод электролюминесценции. Он позволяет установить взаимосвязь электрофизических и оптических свойств светоизлучающих слоев, определить внешний квантовый выход приборных структур, исследовать их деградацию.

В связи с изложенным выше, актуальность диссертационной работы Романова Ивана Александровича, 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 сомнений не вызывает как с научной, так и практической точки зрения. Тематика проведенных исследований соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021 - 2025 гг, в частности пункту 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы».

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту.

Диссертационная работа Романова Ивана Александровича представляет собой комплексное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Новизна работы определяется развитием такого направления физики конденсированного состояния, как получение новых научных знаний на основании результатов экспериментальных и теоретических исследований физических свойств тонкопленочных материалов на основе кремния. Это позволяет разработать новые концепции, а также физические модели, с учетом которых возможно получение новых функциональных материалов и приборных структур с заданными структурными и оптическими характеристиками.

Полученные научные результаты диссертационной работы являются новыми и вносят вклад в расширение представлений о процессах формирования и физических свойствах слоев SiO_2 , SiN_x , а также нанокомпозитов « SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 ». К ним можно отнести следующее:

- установлена природа электролюминесценции двухслойных ($\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$) и трехслойных ($\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$) диэлектрических пленок на кремниевой подложке, а также нанокомпозитов « SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 » в системе электролит – диэлектрик – полупроводник;

- показано, что фотолюминесценция в тонкопленочных структурах $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ при облучении лазером с энергией квантов 3,82 эВ обусловлена электронными переходами в слоях SiN_x , а электролюминесценция – свечением слоев оксида и оксинитрида кремния;

- установлено, что длительное пропускание электрического тока через структуры $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ влияет на интенсивность полос электролюминесценции, а нитрид кремния, осажденный на пленки оксида кремния, защищает эти слои от деградации электролюминесценции и пробоя;

- показано, что имплантация структур SiO_2/Si ионами Sn^+ с энергией 80 кэВ флюенсом $2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и последующий отжиг на воздухе при 900 °С в течение 60 мин ведет к увеличению величины квантового выхода электролюминесценции слоев диоксида кремния на три порядка;

- установлено, что увеличение флюенса имплантации приводит к уменьшению квантового выхода электролюминесценции нанокмозитов « SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 », что обусловлено снижением тока носителей заряда, приводящих к возбуждению электролюминесценции, за счет роста концентрации радиационных дефектов в имплантированных структурах.

Степень новизны полученных результатов и научных положений, выносимых на защиту, подтверждается публикациями в рецензируемых научных изданиях и сборниках материалов научных конференций.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Обоснованность и достоверность сформулированных в работе положений, выводов и рекомендаций подтверждаются соответствием основным положениям физики твердого тела и полупроводников. Результаты выполненных исследований имеют законченный характер, сформулированы достаточно корректно, проверены и подтверждены экспериментально, апробированы на научно-технических конференциях различного ранга, отражены в зарубежных реферируемых журналах. Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, обеспечивается использованием методов исследования, хорошо апробированных в физике полупроводников, их грамотной реализацией в экспериментальных методиках, отсутствием противоречий между результатами, полученными разными методами.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию.

Научная значимость результатов заключается в получении новых знаний и установлении закономерностей синтеза на кремнии диэлектрических композиций на основе пленок оксида и нитрида кремния и слоев SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 и их взаимосвязи с условиями получения и физическими свойствами объектов исследования. Полученные результаты имеют фундаментальный характер и могут использоваться как справочная информация для технологов и разработчиков элементной базы оптоэлектронных компонентов на основе кремния.

Практическая значимость заключается в разработке и оптимизации технологии формирования светоизлучающих пленок на основе оксида и нитрида кремния с физическими характеристиками, удовлетворяющими требованиям для создания тонкопленочных светоизлучающих структур на основе кремниевой технологии. Диссертационная работа представляет практический интерес для использования как одного из технологических этапов производства приборов на предприятиях соответствующего профиля. Получен акт о практическом использовании методики формирования тонких нитридных слоев и многослойных структур $\text{SiO}_2/\text{SiN}_{0.9}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ для изготовления светоизлучающих приборов на предприятии ОАО «Интеграл».

Экономическая значимость работы заключается в возможности перехода к новой технологии получения слоев оксида кремния, имплантированных ионами олова, характеризующейся сниженными энергозатратами и себестоимостью, так как метод не требует сложного технологического оборудования. Значимость также заключается в возможности использования тонкопленочных материалов в устройствах космической и специальной оптоэлектроники, отвечающих требованиям экологической безопасности и низкозатратной промышленности.

Социальная значимость результатов заключается в возможности их использования для подготовки специалистов в области физики и технологии полупроводниковых материалов и приборов в высших учебных заведениях Беларуси. Это подтверждается двумя актами внедрения в учебный процесс на кафедре физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета по дисциплинам «Физика полупроводников и полупроводниковых приборов», «Ионно-фотонные процессы в нанoeлектронике», «Современные методы диагностики материалов и структур твердотельной электроники». Кроме того, в наше время не вызывает сомнений утверждение, что развитие микро- и оптоэлектроники коренным образом улучшает жизнь общества и расширяет возможности применения полупроводниковых приборов.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 21 работа, в том числе 8 статей в рецензируемых научных журналах в соответствии с п. 19 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь», 11 статей в сборниках материалов научных конференций и 2 тезиса доклада на международных конференциях.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.

Оформление диссертационной работы соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Республики Беларусь к кандидатским диссертациям. Содержание работы изложено логически последовательно, грамотным научным языком. При изложении материала в работе использованы общепринятые в физике конденсированного состояния термины. Выводы и положения, выносимые на защиту, сформулированы корректно. Диссертация состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, общей характеристики работы, четырех глав основной части с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и двух приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 164 страницы, включая 55 рисунков на 25 страницах, 13 таблиц на 5 страницах, библиографический список на 27 страницах, содержащий 263 наименования использованных источников, включая 21 публикацию соискателя и 2 приложения на 11 страницах.

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

Анализ диссертации и автореферата Романова Ивана Александровича позволяет сделать вывод об умении соискателя решать поставленные научные задачи с использованием современных методик исследований, грамотно и последовательно излагать полученные результаты. Уровень полученных научных результатов указывает на то, что соискатель является сформировавшимся специалистом высокой квалификации в области физики конденсированного состояния и заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

9. Замечания по диссертационной работе.

1. В выводах к главе 1 желательно было добавить краткий перечень недостатков, которые выявлены из анализа научной литературы по тематике исследования.
2. В диссертации и автореферате не приводятся погрешности измерения элементного состава и межплоскостных расстояний исследуемых материалов.
3. При анализе ВАХ нанокомпозитов «SiO₂ с нанокристаллами SnO₂» следовало бы изучить их температурную зависимость и деградацию электрофизических свойств.
4. Литературный обзор проведен в основном по зарубежным источникам. Недостаточно внимания уделено анализу библиографических источников авторов, представляющих страны СНГ и публикаций за последние 5 лет.
5. Имеются некоторые замечания по тексту и оформлению материала, затрудняющие восприятие результатов диссертационной работы, такие, например, как:
 - в диссертации в подписях к рисункам 1.2, 1.6, 1.7 и 1.8 не указаны литературные источники, из которых они взяты;
 - в первом выводе по главам 3 и 4 нет ссылок на публикации соискателя;
 - параграф 4.1.1 в диссертации желательно было бы назвать «Морфология и кристаллическая структура»
 - по тексту диссертации имеются незначительные опечатки и не всегда правильно расставлены знаки препинания.

Необходимо, однако, отметить, что приведенные выше замечания не затрагивают основных положений и выводов, содержащихся в диссертационной работе, и не снижают ценности полученных результатов.

10. Заключение.

Диссертационная работа Романова Ивана Александровича **Структура и люминесцентные свойства диэлектрических пленок на основе слоев оксида и нитрида кремния и нанокompозитов «SiO₂ с нанокристаллами SnO₂»**, представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, соответствует специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, является завершенной самостоятельно выполненной квалификационной работой, соответствующей требованиям

ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в соответствии с требованиями Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, а ее автор заслуживает присвоения искомой степени за новые научно-обоснованные результаты, включающие:

- установление природы люминесценции в двухслойных (SiN_x/SiO₂) и трехслойных (SiO₂/SiN_x/SiO₂) диэлектрических пленках на кремниевой подложке в зависимости от метода возбуждения люминесценции: кванты с энергией 3,82 эВ или электрический ток;

- определение характера изменения интенсивности полосы электролюминесценции с максимумом при 1,9 эВ при прохождении электрического тока через исследуемые тонкопленочные структуры в зависимости от величины заряда, что может быть использовано при разработке устойчивых к деградации светоизлучающих устройств на основе кремния;

- экспериментально установленные зависимости микроструктуры, электрофизических свойств, природы полос фото- и электролюминесценции нанокompозитов «SiO₂ с нанокристаллами SnO₂» от величины флюенса имплантации ионов олова в оксид кремния и температуры последующих термообработок на воздухе;

- установление характера уменьшения квантового выхода электролюминесценции в нанокompозитах «SiO₂ с нанокристаллами SnO₂» с увеличением величины флюенса имплантации от $2,5 \times 10^{16}$ см⁻² до 1×10^{17} см⁻², что дает возможность более эффективно использовать существующие технологические процессы для изготовления тонкопленочных приборных структур кремниевой оптоэлектроники.

В совокупности, полученные результаты вносят существенный вклад в развитие физики конденсированного состояния в области технологических процессов для создания тонкопленочных светоизлучающих структур на основе кремниевой технологии.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией физики полупроводников Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

В.Ф. Гременок



15.12.2025