

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

Диссертация посвящена установлению закономерностей изменения оптических и электрофизических свойств диэлектрических слоев на основе пленок оксида и нитрида кремния, а также наноконкомпозитов «оксид кремния с нанокристаллами SnO₂» в зависимости от их элементного, структурно-фазового состава, методов формирования и термообработок. Данное исследование относится к актуальным направлениям физики конденсированного состояния, о чем свидетельствуют полученные выводы и защищаемые положения. Представленные результаты входят в области исследований паспорта специальности «физика конденсированного состояния»: п. III.2. Элементный и фазовый состав, структура (строение) и физические свойства конденсированных сред (систем); п. III.5. Изменение состава, структуры и свойств конденсированных сред под влиянием внешних воздействий. Диссертация Романова И. А. полностью соответствует отрасли физико-математических наук специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

2. Актуальность темы диссертации

В последние годы в связи со стремительным ростом потребности в вычислительных мощностях современных дата-центров, искусственных нейронных сетей требуется развитие новых технологий, позволяющих ускорить обработку и передачу данных, а также снизить энергопотребление ЭВМ. Одним из подходов повышения эффективности систем обработки данных является разработка оптоэлектронных устройств, позволяющих передавать информацию между процессорными ядрами и блоками памяти по оптическому каналу. Переход на оптические каналы позволит повысить скорость передачи информации и снизить отношение сигнал/шум. Так как основными материалами для изготовления микросхем остаются кремний, оксид и нитрид кремния разработка светоизлучающих приборных структур на основе этих материалов является актуальной задачей. Нерешенными проблемами разрабатываемых светоизлучающих структур на основе кремния

являются низкий квантовый выход и высокая скорость деградации люминесцентных и электрофизических свойств. Основными задачами диссертационной работы соискателя являлись: определение влияния количества прошедшего заряда через светоизлучающие структуры на деградацию их электролюминесцентных характеристик; повышение внешнего квантового выхода электролюминесценции оксида кремния путем формирования светоизлучающих центров методом имплантации ионов олова; установление закономерностей фото- и электролюминесценции нанокомпозитов « SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 » в зависимости от флюенса имплантации и температуры отжига. Таким образом, исследования, проведенные соискателем по теме диссертации, представляются актуальными с научной и практической точек зрения. Они соответствуют приоритетным направлениям научной деятельности в Республике Беларусь.

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

В диссертационной работе Романова И.А. проведены комплексные исследования структурно-фазовых люминесцентных и электрофизических свойств двухслойных и трехслойных диэлектрических пленок, а также нанокомпозитов « SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 ». Отраженные в научных положениях и выводах результаты исследований являются новыми и впервые получены соискателем. К ним можно отнести следующее:

- показано, что фотолюминесценция композиций $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$, возбуждаемая лазером с энергией квантов 3,82 эВ, обусловлена электронными переходами в слоях SiN_x , а электролюминесценция характеризуется свечением дефектов преимущественно в слоях оксида кремния;

- установлено влияние состава диэлектрических пленок (SiO_x/Si , $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$, $\text{SiO}_x/\text{SiN}_y/\text{SiO}_2/\text{Si}$) на деградацию электролюминесценции в процессе протекания через светоизлучающие слои тока; установлено, что слой нитрида кремния, сформированный между инжектирующим контактом и слоем SiO_x , предохраняет оксид кремния от деградации электролюминесценции;

- продемонстрировано возрастание внешнего квантового выхода электролюминесценции структур SiO_2/Si на три порядка величины в результате имплантации ионами олова (80 кэВ , $2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$) и последующего термического отжига (900°C , 60 мин);

- установлено, что уменьшение квантового выхода ЭЛ нанокомпозитов « 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.

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

Обоснованность и достоверность выводов и положений, выносимых на защиту, подтверждается применением широкого спектра взаимодополняющих методов исследований, включающих резерфордовское обратное рассеяние, спектральную эллипсометрию, сканирующую электронную микроскопию, просвечивающую электронную микроскопию, фото- и электролюминесценцию, тщательным анализом полученных результатов, корректным сопоставлением оригинальных результатов с литературными данными.

Исходя из полученного Романовым И.А. обширного экспериментального материала, сформулированы выводы и рекомендации, интерпретированные на основе принятых и известных в области физики конденсированного состояния моделей люминесценции и проводимости в диэлектриках. Выводы диссертационной работы подтверждены результатами многократных измерений, обоснованы и аргументированы.

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

Проведенные автором исследования и полученные результаты оригинальны, имеют научную и практическую значимость.

Научная значимость полученных результатов заключается в установлении закономерностей изменения люминесцентных и электрофизических свойств тонкопленочных структур на основе слоев оксида и нитрида кремния, слоев оксида кремния, имплантированных ионами олова, в зависимости от их структурно-фазового состава, доз и энергии имплантации, а также способа возбуждения люминесценции. Высокая ценность диссертационной работы обусловлена использованием ряда взаимодополняющих методов исследований, позволяющих установить взаимосвязи элементного и структурно-фазового состава с оптическими и электрофизическими свойствами исследуемых светоизлучающих материалов и структур.

Практическая значимость результатов диссертационной работы состоит в разработке физико-технологических режимов формирования тонкопленочных светоизлучающих структур на основе слоев нитрида и оксида кремния с различным соотношением компонент, а также нанокompозитов « SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 » для создания приборов кремниевой оптоэлектроники.

Экономическая значимость состоит в том, что предложенные светоизлучающие структуры позволят создавать оптоэлектронные приборы для задач кремниевой оптоэлектроники.

Социальная значимость состоит в возможности расширения производства изделий микроэлектроники и оптоэлектроники в Республике Беларусь, организации новых рабочих мест.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати

Все выводы и результаты диссертационной работы подтверждены публикациями 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, включая такие как Journal of Nanomaterials, Materials Letters, Results in Optics, 11 статей в сборниках материалов научных конференций, 2 тезиса доклада на научных конференциях.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Оформление диссертационной работы и автореферата соответствует требованиям ВАК. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, обзорной главы, методической главы и двух оригинальных глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. Обзор и анализ литературы проведен полно и подробно, полностью отражает состояние исследований по теме диссертации. Анализ литературы позволил выявить неразрешенные вопросы, на основе которых сформулирована цель и поставлены задачи исследования. Описание и анализ результатов экспериментальных исследований проведены на высоком научном уровне. Результаты исследований изложены логично и последовательно. Автореферат достаточно полно отражает специфику, значение, оригинальность работы, выводы и основные положения, выносимые на защиту.

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

Диссертационная работа Романова И.А. вносит значительный вклад в развитие физики конденсированного состояния, а именно в направление, связанное с исследованием структурных, оптических и электрофизических свойств тонкопленочных диэлектриков на основе слоев оксида и нитрида кремния, а также нанокompозитов, сформированных методом имплантации ионов олова в слой SiO_2 .

Анализ диссертационной работы, представленных в ней выводов, а также основных публикаций соискателя по теме диссертации позволяет заключить, что научная квалификация соискателя соответствует ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

9. Замечания по диссертационной работе

К основным замечаниям по диссертационной работе Романова И.А. можно отнести следующие:

1. В главе 1 используется термин «ультрафиолет», хотя необходимо использовать термин «ультрафиолетовое излучение»
2. На рис.3.2. приведены результаты только для трехслойных образцов М2 и М3, хотя в тексте описываются все три образца серии М.

3. На стр. 62-63 указано, что на образцах со значительным избытком кремния наблюдается волнистость поверхности. Однако по РЭМ-фото видно, что на поверхности этих образцов видны выделения, которые связаны с избыточным содержанием кремния по отношению к остальной матрице пленок. В такой же ситуации при легировании пленок атомами олова приводится объяснение такой структуры, а для случая избытка кремния такие пояснения отсутствуют.
4. Просчитывалась ли степень увеличения ФЛ за счет интерференции. При интерференции обычно происходит увеличение интенсивности для относительно узкого участка спектра.
5. На стр.103 утверждается «имплантация высоких флюенсов ионов олова в SiO_2 с последующей термообработкой не приводит к существенному изменению концентрации ловушек». Там же в следующем абзаце утверждается «Увеличение концентрации примеси Sn приводит к деградации структуры SiO_2 , ухудшению его диэлектрических свойств». Какое влияние оказывают примеси атомов олова на качество диэлектрических пленок оксида кремния?

Указанные замечания не подвергают сомнению достоверность выносимых на защиту положений и выводов и не снижают научной и практической значимости полученных результатов.

10. Заключение

Диссертационная работа Романова Ивана Александровича «Структура и люминесцентные свойства диэлектрических пленок на основе слоев оксида и нитрида кремния и нанокомпозитов « SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 » по уровню научной новизны и практической значимости полученных результатов соответствует требованиям пп. 20, 21 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь», содержит новые обоснованные результаты, характеризующиеся высокой научной и практической значимостью, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния за:

- установленные закономерности изменения люминесцентных свойств структур $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{SiO}_y/\text{SiN}_x/\text{SiO}_z/\text{Si}$ при изменении стехиометрического состава слоев SiN_x и способа возбуждения люминесценции (оптический и электрический);

- установление влияния слоя нитрида кремния в структурах $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{SiO}_y/\text{SiN}_x/\text{SiO}_z/\text{Si}$ на деградацию электролюминесцентных характеристик слоев оксида кремния;

- экспериментально установленные закономерности изменения структурно-фазового состава, электрофизических свойств, фото- и электролюминесценции нанокомпозитов « SiO_2 с нанокристаллами SnO_2 » в зависимости от дозы имплантации, энергии ионов и температуры термообработки;

- установление корреляции внешнего квантового выхода электролюминесценции нанокompозитов «SiO₂ с нанокристаллами SnO₂» с их электрофизическими свойствами и дозой имплантации ионов олова.

В целом Романов И. А. получил новые научно обоснованные экспериментальные результаты, которые имеют существенное значение для развития физики конденсированного состояния и кремниевой оптоэлектроники.

Официальный оппонент:

начальник Государственного центра
«Белмикрoанализ» научно-технического
центра ОАО «Интеграл»-управляющая
компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
кандидат физико-математических наук, доцент



А.Н. Петлицкий

Подпись А.Н. Петлицкого
И.о. начальника УРЦН



А.М. Копор
15.12.2025г.