

Карзанова Мария Вадимовна

**ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ
С ПРИМЕСЯМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

специальность 01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Нижний Новгород

2013

Работа выполнена на кафедре электроники твёрдого тела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: Демидов Евгений Сергеевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
электроники твердого тела ННГУ им. Н.И.
Лобачевского

Официальные оппоненты: Андреев Борис Александрович,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Института физики микроструктур РАН

Трушин Сергей Александрович,
кандидат физико-математических наук,
начальник научно-исследовательского
отдела Научно-исследовательского
института измерительных систем
им. Ю.Е. Седакова

Ведущая организация: Ярославский филиал
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физико-технологического института РАН

Защита состоится 26 июня 2013 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.01 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Автореферат разослан _____

Учёный секретарь
Диссертационного совета Д 212.166.01
кандидат физ.-мат. наук

Марычев М.О.

Актуальность работы

Волоконно-оптическая связь находит всё более широкое применение для передачи сигналов. Вместе с тем важной является проблема совместимости оптоэлектроники с современной технологией кремниевой твердотельной электроники. В этой связи перспективным является исследование люминесценции ионов эрбия Er^{3+} в кристаллическом, аморфном и пористом кремнии. Это вызвано потребностью в создании кремниевых светодиодов, оптических усилителей и лазеров, эффективно излучающих в районе длин волн около 1.5 мкм в интервале максимума пропускания волоконных линий связи. К настоящему времени детально изучены свойства кремния, легированного эрбием либо непосредственно в процессе эпитаксиального роста [1,2], либо с использованием методов ионной имплантации и диффузии [3]. Для повышения эффективности излучательной способности эрбия в кремнии было также предложено использовать пористый кремний (ПК), который представляет собой систему кремниевых нанокристаллов вкрапленных в матрицу SiO_2 [4]. Квантово-размерные эффекты приводят к такой перестройке электронных состояний, которая позволяет преодолеть непрямозонность монокристаллического кремния, препятствующую созданию кремниевых светоизлучателей для оптоэлектронных устройств. Есть работы, где эрбий вводился в ПК ионной имплантацией, электрохимическим способом, золь-гель методом и пропиткой в растворе солей редкоземельных элементов (РЗЭ). При этом предполагалось повышение эффективности излучения Er за счёт сенсбилизации нанокристаллами кремния. Однако к началу выполнения настоящей работы квантовый выход фотолюминесценции (ФЛ) в таких структурах был невелик. Данная экспериментальная работа посвящена разработке нового эффективного композиционного материала, в котором объединялись бы полезные свойства одного из самых эффективных матричных материалов для люминесценции ионов Er^{3+} - вольфрам-теллуридного стекла (ВТС), легированного иттербием и эрбием, и ПК за счёт дополнительных каналов передачи внешнего возбуждения по схемам: $\text{ncSi} \rightarrow \text{Er}^{3+}$, $\text{ncSi} \rightarrow \text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$. Это стекло отличается низкой температурой плавления, высокой растворимостью ионов РЗЭ, большим сечением вынужденного излучения на переходах внутри 4f-оболочки, малой вероятностью безызлучательных переходов и низким порогом генерации излучения по сравнению с фосфатными и силикатными стеклами [1]. Исследовались тонкоплёночные структуры, представляющих собой слои ПК с вплавленным в них ВТС с примесями иттербия и эрбия.

Цель работы:

Целью настоящей работы является исследование возможностей сочетания полезных свойств одного из самых эффективных матричных материалов для ионов Er^{3+} - вольфрам-теллуридного стекла и пористого кремния в тонкоплёночных структурах за счёт многоканальной передачи энергии внешнего возбуждения к ионам эрбия через нанокристаллы кремния и ионы иттербия в пористом кремнии.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи.

1. Анализ литературных данных и данных предварительных экспериментальных исследований фотолюминесценции эрбия в ПК и в структурах с нанокристаллами кремния.
2. Исследование фотолюминесцентных и электрофизических свойств структур на основе слоёв ПК, пропитанного ВТС, влияние степени окисления ПК, а также оптимизация состава ВТС для усиления ФЛ таких структур.
3. Выяснение влияния ионной имплантации электрически активных и инертных элементов на свойства ПК с примесями РЗЭ.

В ходе выполнения работы применялся комплекс современных экспериментальных методов: высокочастотное (ВЧ) магнетронное распыление, электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), фотолюминесцентная спектроскопия, поперечный транспорт тока, эллипсометрия, высокоразрешающая электронная микроскопия и элементный анализ, рентгеновская дифракция.

Научная новизна работы

1. Впервые была применена методика введения редкоземельных элементов эрбия и иттербия в пористый кремний ВЧ-магнетронным напылением плёнок ВТС на слои ПК с последующими отжигами.
2. Применительно к ВТС с примесями РЗЭ впервые была использована методика многофакторного анализа при определении оптимального состава для достижения максимума ФЛ на длинах волн в районе 1.54 мкм.
3. Впервые были исследованы электрофизические и фотолюминесцентные свойства структур ПК с вплавленным в него ВТС с примесями РЗЭ в зависимости от степени окисления ПК или облучения ионами электрически активных и инертных примесей.
4. В ионно-легированных фосфором образцах ПК обнаружена широкая сравнительно интенсивная полоса ФЛ, захватывающая актуальный для волоконной оптики диапазон длин волн 1,45-1,65 мкм и не связанная с присутствием эрбия.

Практическая значимость

1. Показана возможность создания структур на основе ПК, имеющих эффективную ФЛ на актуальной для волоконной оптики длине волны 1.54 мкм путём сплавления в ПК ВТС с примесями эрбия и иттербия.
2. Показано существенное влияние на фотолюминесцентные свойства структур предварительного окисления ПК, а также облучение ионами инертных (Ar^+ , Ne^+) и электрически активных (P^+) элементов. Определены оптимальные режимы таких обработок для максимального усиления ФЛ.
3. Установлена возможность формирования ионной имплантацией фосфора в ПК

интенсивной ФЛ в актуальном для волоконной оптики диапазоне длин волн 1,45-1,65 мкм, не связанной с присутствием эрбия.

Положения, выносимые на защиту

1. Вплавление ВТС в ПК не приводит к исчезновению в нём наночастиц кремния. При этом подавляется безызлучательная рекомбинация на известных P_b -центрах, сохраняется дискретное туннелирование электронов сквозь nc-Si. Подавление безызлучательной рекомбинации и улучшение люминесцентных характеристик структур ПК/ВТС:(Yb,Er) связано с тем, что вплавление ВТС снимает механические напряжения в ПК на границе раздела Si/SiO₂ и уменьшает количество P_b -центров.
2. Вплавление ВТС, активированного РЗЭ Er и Yb, в окисленный ПК является эффективным способом усиления ФЛ ионов Er³⁺ в районе 1,5 мкм. Присутствие наночастиц кремния в пропитанном ВТС слое ПК на кремнии позволяет на порядок и более увеличить интенсивность ФЛ эрбия и иттербия по сравнению с объёмным ВТС с теми же примесями РЗЭ. Температура предварительного окислительного отжига 700°C является оптимальной для достижения максимума такой ФЛ.
3. Существует оптимальный уровень ионно-лучевого легирования фосфором ПК для усиления его люминесценции в области актуального для волоконной оптики диапазона длин волн 1,45-1,65 мкм, и не связанной с присутствием эрбия. При дозах фосфора более $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ происходит снижение интенсивности ФЛ в указанном диапазоне.
4. Увеличение до 5 раз интенсивности ФЛ эрбия на длине волны 1,54 мкм в результате облучения структур ПК/ВТС:(Yb,Er) ионами P⁺ и Ag⁺ связано с ионным перемешиванием, в результате которого более значительная доля ионов Er³⁺ оказывается расположенной близко к границам нанокристаллов кремния в ПК, и улучшаются условия передачи энергии от возбужденных светом этих нанокристаллов к ионам Er³⁺.

Личный вклад соискателя

Соискатель самостоятельно осуществляла изготовление структур пористого кремния, вместе с к.ф.-м.н. Ю.И. Чигиринским проводила оптимизацию состава вольфрам-теллуридного стекла, осуществляла ВЧ-магнетронное напыление пленок этого стекла на кремний и пористый кремний, самостоятельно проводила измерения ЭПР. Вместе со студентом Е.А. Европейцевым проводила измерения электротранспортных свойств слоёв пористого кремния после различных обработок, самостоятельно выполняла измерение спектров ФЛ. Совместно с научным руководителем соискатель выполняла теоретические оценки и расчёты, подготовку графических материалов и написание статей по результатам исследований, лично докладывала часть результатов на научных конференциях.

Достоверность научных результатов

Достоверность полученных результатов, обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечиваются использованием современного научного оборудования, комплекса хорошо апробированных физических методов исследования, корректных теоретических представлений при анализе и интерпретации экспериментальных результатов.

Апробация работы

Основные результаты работы обсуждались и докладывались на конференциях: 15-я и 16-я Нижегородская сессия молодых учёных (г. Нижний Новгород 2010, 2011 гг), 16-я Всероссийской конференции студентов физиков и молодых учёных (г. Волгоград, 2010г.), 9-я и 10-я Всероссийская конференция с элементами молодёжной научной школы: “Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики” (г. Саранск, 2010, 2011гг.), XI и XIII Всероссийская молодёжная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (г. Екатеринбург, 2010, 2012 гг.), XV-й и XVI международный симпозиум “Нанопластика и наноэлектроника” (Н. Новгород, ИФМ РАН 2011 и 2012 гг.), Материалы 17-й всероссийской конференции студентов физиков и молодых учёных, (г. Екатеринбург, 2011г), Материалы XLIX Международной научной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс”, (Новосибирск, 2011г.), Тезисы докладов XIV Всероссийской конференции и VI Школы молодых учёных “Высококачественные вещества и материалы. Получение, анализ, применение.” (Нижний Новгород ИХВВ 2011г.), VIII и IX Международная конференция и VII и VIII Школа молодых ученых и специалистов «КРЕМНИЙ 2011» (Москва, НИТУ «МИСиС» 2011), XIII Международной конференции “Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы” (Ульяновск 2011г), V Всероссийская школа семинар студентов, аспирантов и молодых учёных “Нанодиагностика – 2012” (г. Рязань, 2012г.).

Публикации. По материалам работы опубликовано три статьи в научных журналах из списка ВАК, и 16 публикаций в материалах конференций.

Диссертационная работа выполнялась при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и при поддержке РФФИ (гранты №№ 08-02-97044р, 11-02-00855а).

Структура и объём работы

Работа изложена на 133 страницах, содержит 75 рисунков, 11 таблиц, состоит из введения, четырёх глав и списка используемой литературы из 117 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности выбранного направления исследований, сформулированы основные цели и задачи работы, изложены основные результаты работы и положения, выносимые на защиту.

В главе 1 представлен обзор работ, посвященных исследованию ФЛ ионов эрбия в кремниевых нанокристаллах, в монокристаллическом кремнии и ПК. Из обзора следует, что к началу выполнения настоящей работы было предпринято много попыток реализовать ФЛ эрбия в различных кремниевых наноструктурах. Имеются определённые достижения, однако квантовый выход ФЛ в таких структурах был невелик. Особый интерес представляет дальнейшая разработка идеи использования нанокристаллов кремния в ПК в качестве сенсibilизатора ФЛ внедрённых в этот материал ионов эрбия. Необходимы поиски новых вариантов заполнения пор ПК более эффективным материалом с примесью эрбия. Сформулирована главная задача, состоящая в исследовании возможности внедрения в поры ПК вольфрам-теллуридного стекла (ВТС) с примесями Er и Yb, которое считается рекордным по квантовой эффективности ФЛ ионов РЗЭ; а также в изучении спектров ФЛ этого нового композитного материала в комплексе с ЭПР, который, как следует из обзора, важен для наблюдения Р_b-дефектов, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации, и транспортных свойств ПК, позволяющих судить о сохранности наночастиц Si, с привлечением структурных методов и элементного анализа. Также ставилась задача выяснить влияние окислительных отжигов ПК и ионной имплантации инертных и химически активных элементов на свойства структур ПК/ВТС:(Er, Yb).

В главе 2 описана технология изготовления образцов ПК с напыленными на них тонкими пленками ВТС и последующего их сплавления. Плёнки ВТС с примесями РЗЭ Er и Yb наносились на слои ПК методом ВЧ-магнетронного распыления. Сравнительно низкая температура сплавления ВТС 500°C оказалась, как показано в следующих главах, достаточной для проникновения ВТС в поры ПК и, вместе с тем, предотвращала исчезновение наночастиц кремния в ПК вследствие окисления и переноса кислорода от оксидов ВТС к кремнию. Для окончательного окисления элементов ВТС и активации ионов Er³⁺ и Yb³⁺ применялся окислительный отжиг на воздухе при температуре 500°C. Для сравнения аналогичным образом были нанесены пленки ВТС на кремнии без слоя ПК. Изготовленные структуры схематично показаны на рис.1.



Рис.1. Схематическое изображение исследуемых структур: а) ПК/ВТС; б) Si/ВТС

Далее в главе 2 описаны экспериментальные методы измерений поперечного транспорта тока, ЭПР и ФЛ ПК, пропитанного ВТС с примесями РЗЭ Er и Yb.

В третьей главе была изучена возможность сочетать в тонкоплёночной структуре полезные свойства ПК и ВТС, реализовав многоканальную передачу по схеме: $\text{ncSi} \rightarrow \text{Er}^{3+}$, $\text{ncSi} \rightarrow \text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$ (см. рис.2). Согласно этой схеме, кроме передачи внешнего возбуждения непосредственно ионам Er^{3+} , а также ионам Yb^{3+} с последующей передачей энергии ионам Er^{3+} , появляются два дополнительных канала транспорта энергии атомам эрбия через нанокристаллы кремния в ПК: $\text{ncSi} \rightarrow \text{Er}^{3+}$, $\text{ncSi} \rightarrow \text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$.

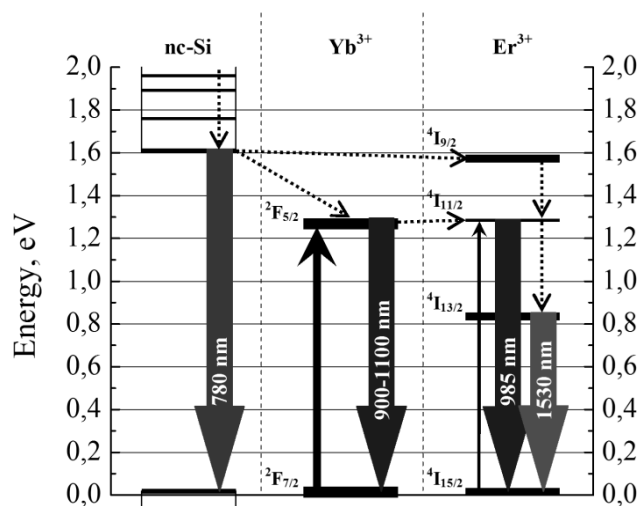


Рис.2. Возможные варианты многоканальной передачи энергии возбуждения к ионам Er^{3+} через нанокристаллы кремния и ионы Yb^{3+} при накачке нанокристаллов кремния излучением с длинами волн меньше 780 нм.

В разделе 3.1 Приведены экспериментальные результаты, показывающие возможности использования слоёв ПК с вплавленным ВТС, легированным Er и Yb, для усиления ФЛ ионов Er^{3+} . Использовался монокристаллический кремний с ориентациями (100) и (110) марок КДБ 0.3 (р- типа) и КЭС 0.01 (n- типа).

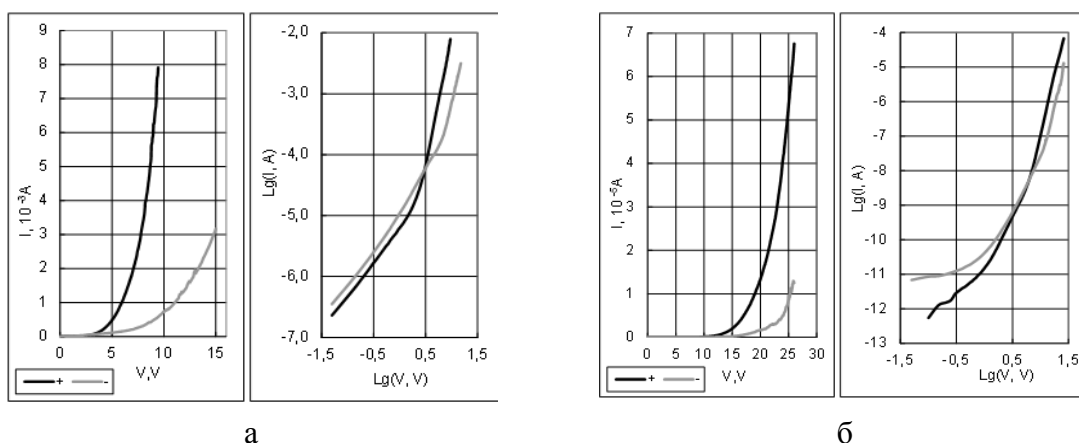


Рис.3. ВАХ диодных структур: а – с прослойками ПК на КЭС 0.01, б – с прослойкой ПК и слоем ВТС на КЭС 0.01.

Данные поперечного транспорта тока на рис.3 показывают, что вплавление ВТС в ПК привело к снижению проводимости пористого слоя. Вместе с тем ВАХ имели такой

же вид, как и для исходных пористых слоёв кремния, содержали характерные для дискретного туннелирования сквозь наногранулы кремния три участка: линейный при малых токах, участок экспоненциального роста тока с ростом напряжения и участок, соответствующий выходу из режима кулоновской блокады туннелирования [2]. Такой функциональный вид ВАХ на рисунках 3а и 3б означает, что сплавление ВТС не привело к исчезновению наночастиц кремния вследствие их химического взаимодействия с этим низкоплавким оксидом.

Другой признак сохранения в ПК наночастиц кремния после сплавления ВТС демонстрируют данные ЭПР на рис.4 с характерными спектрами известных R_b -центров безызлучательной рекомбинации. Ослабленный сигнал ЭПР в образцах ПК, предварительно окисленного при 1000°C, может быть обусловлен исчезновением части наночастиц кремния вследствие их высокотемпературного окисления.

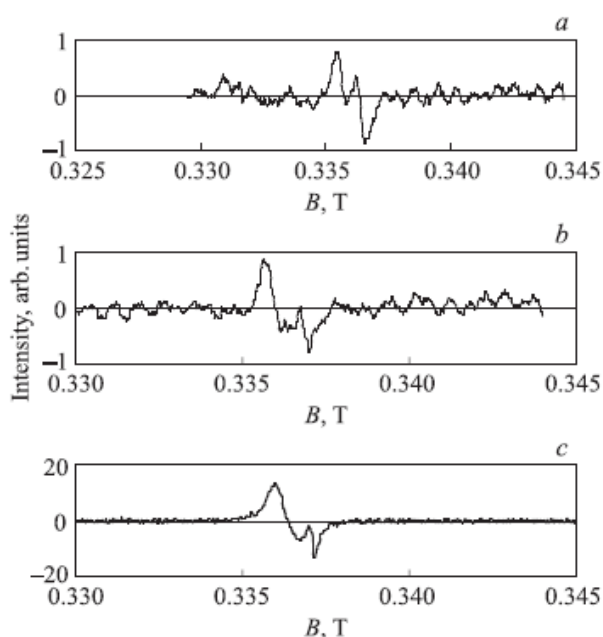


Рис.4. Спектры ЭПР ПК, пропитанного ВТС на КЭС 0.01 для перпендикулярной (а) и параллельной (б,с) ориентациях образца. а, б - ПК, предварительно окисленный при 1000°C, с - ПК без предварительного отжига.

Были проведены эксперименты по поиску наилучшего варианта подготовки образцов для усиления ФЛ. В качестве исходных использовались образцы КЭС 0.01 и КДБ 0.3 со слоем ПК и без него. Отработаны следующие варианты: 1) предварительный окислительный отжиг в кислороде перед нанесением пленки ВТС (ПОО) при температуре 1000°C; 2) ПОО+ вакуумный отжиг после сплавления плёнки ВТС (ВО) при температуре 500°C; 3) ПОО+ВО+ окислительный отжиг в кислороде плёнки ВТС (ОО) при температуре 500°C. Наилучшие результаты усиления ФЛ, показанные на рис.5, получены для структуры ПК/ВТС на КДБ 0.3, обработанной в соответствии с вариантом 3. Таким образом показано, что в структурах ПК/ВТС(Er,Yb) на кремнии при длинноволновом возбуждении имеет место увеличение на порядок квантового выхода ФЛ эрбия (1530 нм), а при коротковолновой накачке - почти в 50 раз для иттербия (980 нм) и в 25 раз для эрбия по сравнению с объёмным ВТС. Это усиление ФЛ связывается с дополнительными каналами передачи внешнего возбуждения через нанокристаллы кремния в ПК к

примесным ионам иттербия и эрбия в ВТС по схемам: $\text{nc-Si} \rightarrow \text{Er}^{3+}$, $\text{nc-Si} \rightarrow \text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$ согласно схеме на рис.3.

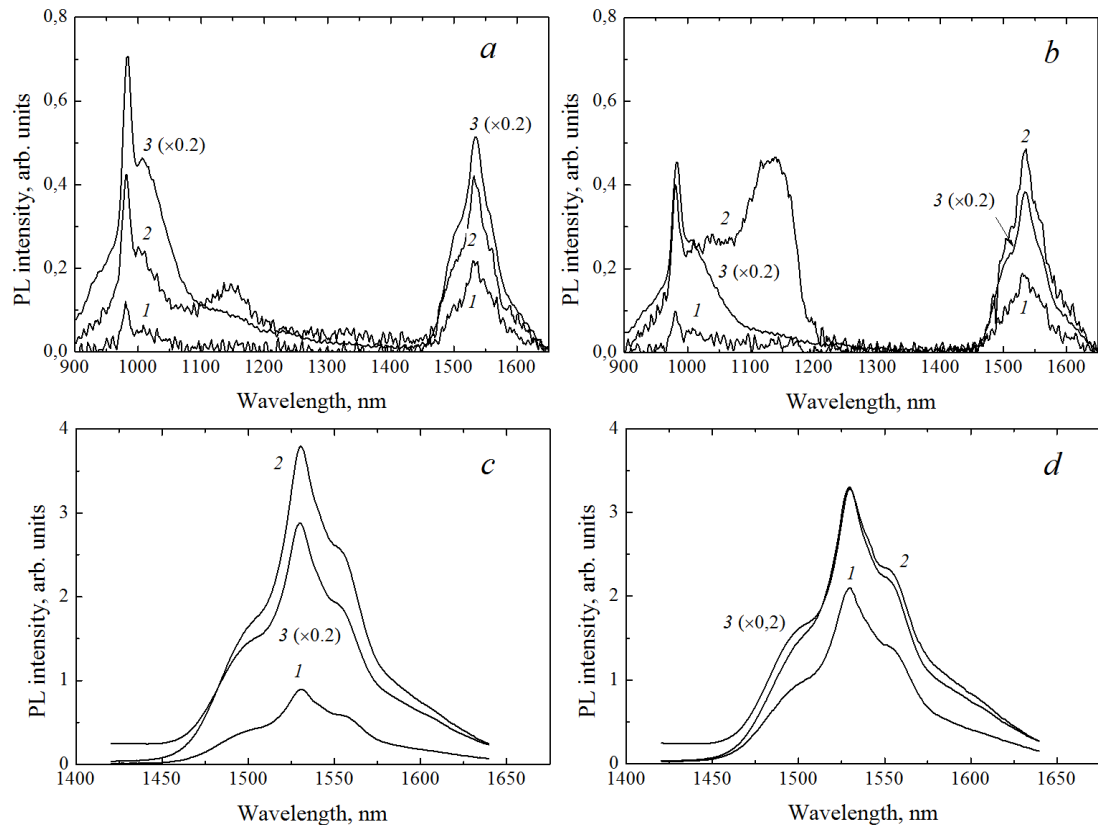


Рис.5. Спектры ФЛ пленок ВТС, осажденных на подложки марки КДБ 0.3: 1— без пористого слоя, 2, 3- с пористым слоем после сплавления ВТС и после дополнительного окислительного отжига при 500°C соответственно; возбуждение проводилось на длине волны $\lambda_{\text{exc}}=488$ нм (a,b) и 985 нм (c,d); b,d - для ПК, предварительно окисленного при 1000°C.

В разделе 3.2 описана процедура оптимизации состава ВТС:(Er,Yb) с целью достижения максимального квантового выхода ФЛ эрбия. Применены методы многофакторного эксперимента: полный факторный эксперимент, метод крутого восхождения и метод ортогонального планирования второго порядка [3]. Для проведения экспериментов было выбрано ВТС состава в молярных процентах $67\% \text{TeO}_2 + 25\% \text{WO}_3 + 5\% \text{La}_2\text{O}_3 + d\% \text{Na}_2\text{O} + 1\% \text{Er}_2\text{O}_3 + c\% \text{Yb}_2\text{O}_3$.

Как показали предварительные эксперименты, основными параметрами, влияющими на люминесцентные свойства этих стекол, являются: молярный процент (d) оксида Na, молярный процент (l) оксида Er и соотношение (m) молярных процентов оксида Yb (c) и оксида Er. Они варьировались в данном эксперименте как независимые факторы.

Выбранный состав отличается от применённого ранее $70,75\% \text{TeO}_2 + 25\% \text{WO}_3 + 3\% \text{La}_2\text{O}_3 + 1\% \text{Er}_2\text{O}_3 + 0,25\% \text{Yb}_2\text{O}_3$ меньшей вязкостью при температуре 500°C, большей эффективностью ФЛ эрбия при почти на порядок меньшей долей РЗЭ путём замещения части компонентов диоксидом натрия, который введён для уменьшения гасящего влияния на люминесценцию ионов ОН-групп, практически всегда присутствующих при синтезе ВТС [4]. В результате проведенных экспериментов было получено стекло оптимального

состава $67\% \text{TeO}_2 + 25\% \text{WO}_3 + 5\% \text{La}_2\text{O}_3 + 2.5\% \text{Na}_2\text{O} + 0.175\% \text{Er}_2\text{O}_3 + 0.33\% \text{Yb}_2\text{O}_3$. Полученный состав ВТС далее использовался для напыления плёнок на слои ПК и усиления ФЛ ионов Er^{3+} .

В разделе 3.3 исследовалось влияние степени окисления ПК перед вплавлением ВТС. Предполагается, что наличие оксидной фазы предотвращает декомпозицию ВТС из-за непосредственного химического взаимодействия кремния с компонентами этого стекла и возможное уменьшение квантового выхода ФЛ ионов РЗЭ. Вместе с тем следует ожидать, что по мере окисления ПК сравнительно крупные фрагменты кремния в пористом слое распадаются на мелкие нанокристаллы [10] и, тем самым, увеличивается полезный вклад этих наночастиц в усиление ФЛ эрбия по каналам: $\text{nc-Si} \rightarrow \text{Er}^{3+}$, $\text{nc-Si} \rightarrow \text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$. Изучено влияние ПОО ПК при температурах 500-900°C перед нанесением пленки ВТС на ФЛ при лазерной накачке на длинах волн 532 и 980 нм, на ЭПР и поперечный транспорт тока структур на основе ПК с вплавленным ВТС, легированном Er и Yb.

Как сказано выше, образцы ПК/ВТС показали анизотропный спектр ЭПР, состоящий из трёх линий тонкой структуры с характерной угловой зависимостью известных P_b -центров безызлучательной рекомбинации на нанокристаллах кремния в ПК, что является признаком сохранения этих наночастиц в ПК после ПОО во всём интервале температур от 500 до 900°C и вплавления ВТС при 500°C. Сигнал ЭПР от P_b -центров монотонно спадает с увеличением температуры от 500 до 700°C почти на порядок, как показано на рис.6.

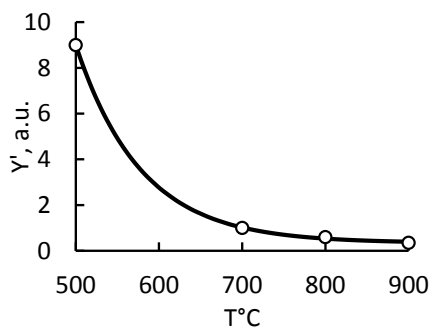


Рис.6. Зависимость амплитуды первой производной Y' спектра поглощения ЭПР при 293К P_b -центров в структурах ПК/ВТС от температуры ПОО.

Изучена зависимость спектров ФЛ структур ПК/ВТС и плёнок ВТС на подложке кремния без слоя ПК от температуры ПОО при возбуждении на длине волны $\lambda_{\text{exc}} = 980$ нм. Применение этой длинноволновой накачки, когда ионы Er^{3+} возбуждаются непосредственно внешним излучением лазера без участия нанокристаллов кремния, необходимо было для проверки сохранения люминесцентных свойств вплавленного в ПК ВТС на длинах волн около 1,5 мкм. ПОО ПК/ВТС при температурах до 700°C приводит к увеличению интенсивности ФЛ эрбия в 300 раз по сравнению с вариантом ВТС/Si и в 70 раз по сравнению со структурой ПК/ВТС без предварительного отжига ПК. Это может быть связано с выше названной причиной: наличием оксидной фазы, предотвращающей декомпозицию ВТС и возможное уменьшение квантового выхода люминесценции ионов РЗМ из-за непосредственного взаимодействия кремния с компонентами этого стекла при

его последующем вплавлении при 500°C. Вместе с тем, ПОО при температурах выше 800°C приводит к резкому спаду ФЛ ионов эрбия. По-видимому, при повышенных температурах ПОО происходит исчезновение большей части мелких наночастиц кремния, а те наночастицы, которые появляются в результате распада сравнительно крупных фрагментов Si в ПК, поглощают большую часть излучения на длине волны 980 нм.

При коротковолновом возбуждении, $\lambda_{\text{exc}} = 532$ нм, также имело место монотонное возрастание интенсивности ФЛ нанокристаллов кремния с ростом температуры ПОО вследствие вышеупомянутого образования большего числа наночастиц кремния из-за распада сравнительно крупных фрагментов кремния при их окислении в ПК. В структуре ПК-ВТС с ПОО при 900°C интенсивность ФЛ nc-Si в ПК возросла в 16 раз по сравнению с ПК-ВТС без предварительного отжига ПК.

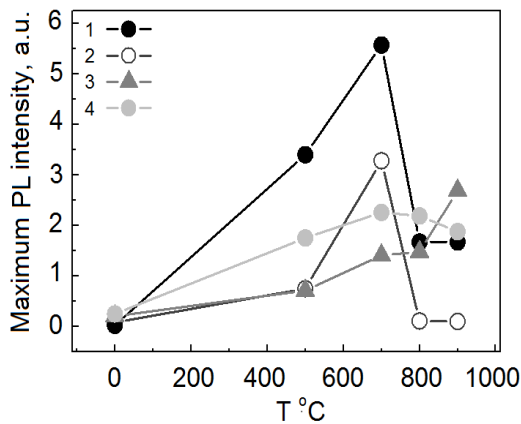


Рис.7. Зависимости максимума интенсивности ФЛ от температуры ПОО для ионов Er^{3+} ($\lambda_{\text{max}} = 1540$ нм) при возбуждении второй гармоникой неодимового лазера на длине волны $\lambda_{\text{exc}} = 532$ нм (кривая 1) и при возбуждении полупроводниковым лазером на длине волны $\lambda_{\text{exc}} = 980$ нм (кривая 2); для нанокристаллов кремния ($\lambda_{\text{max}} = 780$ нм) (кривая 3) и для ионов Yb^{3+} при возбуждении неодимовым лазером на длине волны $\lambda_{\text{exc}} = 532$ нм (кривая 4).

Наиболее эффективной для усиления ФЛ ионов Er^{3+} и Yb^{3+} оказалась температура ПОО 700°C. Интенсивность ФЛ ионов Er^{3+} такой структуры ПК/ВТС на длине волны 1540 нм возросла в 70 раз при коротковолновой накачке и в 7 раз при длинноволновой, а интенсивность ФЛ ионов Yb^{3+} возросла в 9 раз при накачке второй гармоникой неодимового лазера по сравнению со структурой без предварительного отжига. При температурах свыше 800°C, как при коротковолновом, так и при длинноволновом возбуждении, происходит спад эрбиевой люминесценции, который в схемах передачи возбуждения $\text{nc-Si} \rightarrow \text{Er}^{3+}$, $\text{nc-Si} \rightarrow \text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$ может быть связан с увеличением прослойки оксида кремния между нанокристаллами кремния и ионами РЗМ в ВТС и ослаблению непосредственной передачи возбуждения между этими оптически активными центрами в ПК/ВТС. Изменения интенсивностей ФЛ нанокристаллов кремния в ПК при обоих вариантах возбуждений 980 нм и 532 нм представлены на рис.7, где по вертикали отложены зависимости максимума ФЛ вблизи $\lambda = 1540$ нм ионов Er^{3+} , вблизи $\lambda = 980$ нм ионов Yb^{3+} , и вблизи 780 нм nc-Si в ПК структур ПК-ВТС от температуры ПОО.

Ранее [5] было показано, что окислительные отжиги образцов ПК при температурах до 700°C приводили только к подавлению ФЛ nc-Si в районе 0.6-0.9 мкм. При этом в ПК на КДБ 0.3 и КЭС 0.01 возрастала интенсивность спектра ЭПР от P_b -центров

безызлучательной рекомбинации, которые в [5] связывались с дислокациями в нанокристаллах кремния, наводимыми механическими напряжениями, возникающими из-за разницы коэффициентов термического расширения кремния и диоксида кремния. Представленные здесь данные указывают на то, что вплавленное ВТС снимает такие механические напряжения и приводит к уменьшению в ПК числа P_b -центров безызлучательной рекомбинации. Это подавление P_b -центров усиливается с ростом температуры ПОО, что приводит к спаду интенсивности ЭПР и росту интенсивности ФЛ нанокристаллов кремния и ионов Er^{3+} .

В главе 4 исследуется влияние степени легирования электрически активных и инертных примесей на свойства ПК с примесями РЗЭ. Представлены результаты изменения свойств композитных слоёв ПК/ВТС, подвергнутых имплантации ионами инертных и электрически активных элементов.

В разделе 4.1 для легирования ПК используется оригинальная методика, основанная на встраивании оптически активных ионов РЗЭ в слои ПК, легированного мелкими примесями. В качестве исходного материала использовались пластинчатые монокристаллы кремния КДБ-0,3 с ориентацией (111), легированные до концентрации дырок $p \approx 1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ мелкими акцепторными примесями бора. Такой выбор типа и уровня легирования исходных кристаллов кремния основан на данных [6], согласно которым существует оптимальный невысокий уровень легирования мелкими примесями для максимального квантового выхода люминесценции нанокристаллов кремния.

Наряду с вышеописанным композиционным материалом ПК/ВТС в экспериментах с ионной имплантацией в качестве альтернативного варианта изучалось введение РЗЭ в ПК путём применения трёх вариантов пропитки пор водными растворами солей. В первом варианте (YENKB) предполагалось сформировать известное по высокому квантовому выходу люминесценции Na-K-Ba- силикатное стекло с 3% примеси Yb и 1% – Er. ПК пропитывался водным раствором солей $NaNO_3$, KNO_3 , $Ba(NO_3)_2$ и $(Yb:Er=3:1)(NO_3)_3$. Во втором варианте (YEN), образцы с пористым слоем погружались в водный раствор 70% азотной кислоты HNO_3 , в которой предварительно были растворены оксиды Yb_2O_3 и Er_2O_3 в количестве 180 г/л и 60 г/л, соответственно. В третьем варианте (YEC) образцы с пористым слоем погружались в водный раствор 60% соляной кислоты HCl , в которой предварительно были растворены оксиды Yb_2O_3 и Er_2O_3 в количестве 180 г/л и 60 г/л соответственно. После удаления излишков электролита с поверхности образцы высушивались при температурах 70°C и 150°C, затем отжигались на воздухе при температурах 500-1050°C.

Снимались спектры ФЛ при 77 и 300 К в диапазоне 400-1650 нм образцов ПК на кристаллах до и после имплантации ионов фосфора и с различными вариантами введения ионов РЗЭ. Данные ФЛ показывают близкие по виду спектры, свидетельствующие о сравнительно интенсивном свечении в интервале длин волн 650-950 нм нанокристаллов Si в ПК. Наибольшая интенсивность ФЛ имеет место после пропитки в растворах азотнокислых солей. Наличие в растворе Na, K и Ba приводит к подавлению красной

люминесценции. Вероятно, силикатное стекло Na-K-Ca, образующееся при отжиге 500 °С, приводит к некоторому возрастанию центров безызлучательной рекомбинации или к растворению в этом стекле части НК кремния. Такая ФЛ в меньшей степени гасилась в ПК силикатным стеклом на кристаллах Si, имплантированных фосфором с дозой $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Максимум ФЛ при этом сместился в длинноволновую область, вероятно, вследствие исчезновения наиболее мелких нанокристаллов кремния или роста центров безызлучательной рекомбинации. Последнее подтверждается ещё большим гашением ФЛ при больших дозах имплантации фосфора.

В измерениях ФЛ как при комнатной температуре, так и при 77К в диапазоне длин волн 1000-1650 нм не удалось различить на фоне шумов люминесценцию ионов эрбия Er^{3+} вблизи $\lambda = 1540 \text{ нм}$. Наблюдалось лишь усиление “дефектной” ФЛ кремния с максимумами 1120 нм и 1200 нм. Проявилась широкая, простирающаяся на весь диапазон, полоса ФЛ в ПК на необлученных фосфором кристаллах после обработок в азотнокислых и солянокислых растворах. Попытки активировать эрбиевую ФЛ отжигами при 700°С не увенчались успехом. Отжиги при более высокой температуре 1050°С привели к резкому ослаблению красной ФЛ, связанная с нанокристаллами кремния в ПК. Вместе с тем при 77 К появился сравнительно узкий пик ФЛ вблизи $\lambda = 1540 \text{ нм}$ связанный с Er^{3+} , который был наиболее интенсивен у ПК на кремнии, имплантированном ионами P^+ с дозой $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, и практически такой же по амплитуде как и в ПК на не имплантированном фосфором кремнии. При более высоких дозах происходит уменьшение квантового выхода ФЛ Er , вероятно, вследствие того, что 1) избыточное легирование нанокристаллов Si электрически активными донорами фосфора приводит к Оже-рекомбинации [7], 2) имеет место частичное разрушение пористого слоя из-за преципитации фосфора или возрастания уровня механических напряжений. Из этих данных следует, что оптимальная доза имплантации фосфора должна быть меньше, чем $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

Было обнаружено, что в ПК на легированных имплантацией фосфора образцах кремния возникла сравнимая по интенсивности с излучением Er широкая полоса ФЛ в области длин волн 1350-1650 нм, которая не зависела от пропитки азотнокислыми солями РЗЭ, также наиболее интенсивна у ПК на кремнии, имплантированном ионами P^+ с дозой $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и гасится с ростом дозы. По-видимому, присутствие имплантированного фосфора при образовании ПК и высокотемпературный отжиг приводят к образованию в оксиде кремния сравнительно эффективных центров излучательной рекомбинации. Причём, для формирования таких центров доза имплантации должна быть умеренной. Эти центры в прикладном плане выгодно отличаются от эрбиевых значительно большей шириной полосы люминесценции и, следовательно, могли бы обеспечить передачу большего потока информации по волоконным линиям связи.

В разделе 4.2 исследуется влияние облучения ионами Ar^+ Ne^+ и P^+ на люминесцентные свойства пористого кремния, пропитанного ВТС с примесями Er и Yb (ВТС:(Er , Yb)). Использовались пластины кремния КДБ-2 с ориентацией (111), на которых

формировался ПК и вплавлялось ВТС. Для нанесения плёнок ВТС использовалась мишень состава 70,75% TeO_2 + 25% WO_3 + 3% La_2O_3 + 0,25% Er_2O_3 + 1% Yb_2O_3 .

На этом этапе исследований кроме измерительного инструментария, описанного в главе 2, появилась возможность применения сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (СПЭМ) и элементного анализа (ЭА) поперечного среза слоёв ПК на приборе JEM-2100F фирмы JEOL. Получен принципиально важный результат. Из сопоставления данных СПЭМ и ЭА, в дополнение к ранее полученным данным, следует, что при сплавлении ВТС в ПК действительно произошла пропитка пор этим стеклом.

Образцы облучались ионами инертных элементов (Ar^+ , Ne^+) и химически активного фосфора P^+ . Для сравнения облучению ионами подвергались пленки ВТС, нанесенные на подложку кремния без пористого слоя. Выбор сорта ионов, доз и энергий ионов P^+ , Ar^+ и Ne^+ был обусловлен соображениями, связанными с процессом накопления радиационных дефектов в нанокристаллах кремния и аморфизацией последних, осуществлялся на основе расчетов методом SRIM [9] распределений ионов и *dpa* (displacements per atom) [8]. Для конкретных сорта и дозы ионов энергия ионов подбиралась так, чтобы максимум распределения внедрённых атомов был в середине слоя ПК/ВТС, доза – чтобы обеспечить близкие величины *dpa*.

Оказалось, что во всех трёх вариантах имплантируемых ионов с ростом дозы имеет место гашение красной ФЛ ПК без ВТС (рис.8а), что может быть связано с аморфизацией нанокристаллов кремния и накоплением центров безызлучательной рекомбинации. Большую радиационную стойкость этой ФЛ обеспечивает присутствие ВТС в композитных слоях ПК/ВТС (рис.8б). Также во всех трёх вариантах имплантируемых ионов рост дозы практически не влияет на ФЛ ионов Er^{3+} слоёв ВТС на Si без ПК (рис.8с).

Наиболее важно, что при облучении ионами P^+ и, особенно, Ar^+ существенно, до 5 раз, усиливается интенсивность фотолюминесценции эрбия на длине волны 1,54 мкм (рис.8д). Поскольку этого нет у контрольных пленок ВТС, нанесенных на массивный кремний, резонно предположить, что усиление обусловлено повышением эффективности сенсibilизации люминесценции наногранулами кремния в пористом слое. По-видимому, это связано с ионным перемешиванием, в результате которого более значительная доля ионов Er^{3+} оказывается расположенной близко к их границам, что улучшает условия передачи энергии от возбужденных светом нанокристаллов кремния к ионам Er^{3+} и это тем сильнее проявляется, чем больше масса имплантируемого иона.

Усилению ФЛ может способствовать и аморфизация nc-Si. В литературе есть сведения, что сенсibilизация Er^{3+} аморфными нанокристаллами кремния является более эффективной по сравнению с сенсibilизацией кристаллическими кластерами. При дозе $\sim 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в случае облучения P^+ и Ar^+ происходит снижение интенсивности ФЛ Er. Это, вероятно, обусловлено процессами, приводящими к изменению химической природы нанокристаллов кремния или их ионно-стимулированным “растворением” в стекле, гомогенизацией нанокомпозитной системы.

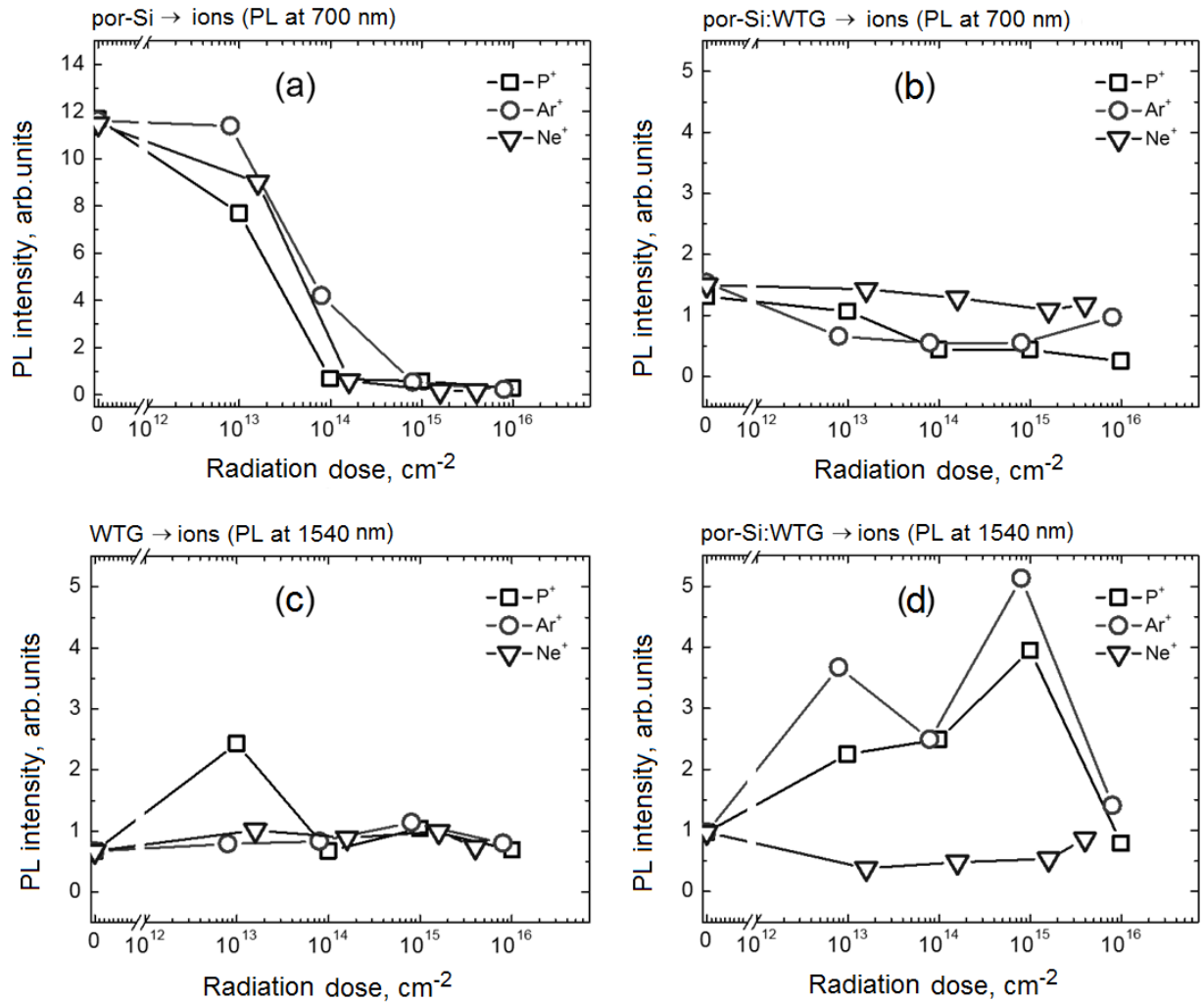


Рис. 8. Дозовые зависимости интенсивности ФЛ при 700 нм и 1540 нм образцов ПК/ВТС, ПК и плёнок ВТС на кремниевых подложках, облученных ионами P^+ , Ar^+ и Ne^+ .

Данные ЭПР для ПК без ВТС согласуются с данными о гашении ФЛ нанокристаллов кремния. Согласно данным ЭПР растёт число центров безызлучательной рекомбинации. Для структур ПК/ВТС по спектрам ЭПР наблюдалась большая радиационная стойкость. Рентгеновская дифракция подтверждает наличие нанокристаллов кремния в ПК и ПК/ВТС и аморфизацию этих наночастиц с ростом дозы имплантируемых ионов. Данные СПЭМ и ЭА показывают, что при облучении ионами Ar^+ с дозой $8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ имеет место разбухание слоя ПК/ВТС, что, видимо, привносит вклад в усиление ФЛ эрбия. Вместе с тем, в результате облучения в этом слое появляются крупные каверны или блистеры.

Основные результаты и выводы

1. Данные ЭПР и поперечного транспорта тока показали, что сплавление ВТС не приводит к исчезновению в нём наночастиц кремния. При сплавлении ВТС в ПК подавляются P_b -центры безызлучательной рекомбинации, сохраняется дискретное туннелирование электронов сквозь нанокристаллы кремния. Подавление P_b -центров и

- улучшение люминесцентных характеристик ПК/ВТС связано с тем, что вплавление ВТС снимает механические напряжения в ПК на границе раздела Si/SiO₂.
2. Установлено, что вплавление ВТС, активированного РЗЭ Er и Yb, в окисленный ПК является эффективным способом многократного усиления ФЛ ионов Er³⁺ в районе 1,5 мкм и ионов Yb³⁺ в районе 0,98 мкм по сравнению с объёмным ВТС с теми же примесями РЗЭ. Показано, что в структурах ПК/ВТС(Er,Yb) на кремнии при длинноволновом возбуждении имеет место увеличение на порядок квантового выхода ФЛ эрбия (1530 нм), а при коротковолновой накачке - почти в 50 раз для иттербия (980 нм) и в 25 раз для эрбия по сравнению с объёмным ВТС. Это усиление ФЛ связывается с дополнительными каналами передачи внешнего возбуждения через нанокристаллы кремния в ПК к примесным ионам иттербия и эрбия в ВТС по схемам: nc-Si→Er³⁺, nc-Si→Yb³⁺→Er³⁺.
 3. Предварительный окислительный отжиг ПК перед вплавлением ВТС способствуют многократному усилению ФЛ как ионов Er в ВТС, так и nc-Si в ПК на длинах волн 750 и 1540 нм, соответственно. Оптимальной для усиления ФЛ ионов эрбия является температура отжига 700°C. При таком отжиге квантовый выход ФЛ ионов Er³⁺ увеличился в 70 раз при коротковолновой накачке и в 7 раз при длинноволновой по сравнению со структурой без предварительного отжига. В структуре с предварительным окислительным отжигом 900°C интенсивность ФЛ nc-Si возросла в 16 раз.
 4. В ионно-легированных фосфором образцах ПК (100кэВ, 5·10¹³см⁻²), где эрбий вводился пропиткой водными растворами солей, обнаружена широкая сравнительно интенсивная полоса ФЛ, захватывающая актуальный для волоконной оптики диапазон длин волн 1,45-1,65 мкм, и не связанная с присутствием эрбия. Эта люминесценция спадает при превышении дозы имплантации фосфора свыше 10¹³ см⁻². Существует оптимальный уровень легирования фосфором для улучшения такой люминесценции.
 5. При облучении ионами P⁺ и Ar⁺ слоёв ПК/ВТС:(Yb,Er) до 5 раз усиливается интенсивность фотолюминесценции эрбия на длине волны 1,54 мкм. Это связано с ионным перемешиванием, в результате которого более значительная доля ионов Er³⁺ оказывается расположенной близко к границам нанокристаллов кремния в ПК и улучшаются условия передачи энергии от возбужденных светом этих нанокристаллов к ионам Er³⁺.

Цитируемая литература

1. Яхкинд А. Физико-химические свойства и структура теллуридных стёкол./Под. ред. А. Власова и В. Флоринской.-Л.: Химия,1974 - 353 с.
2. Дискретное туннелирование в электронных транспортных свойствах наногранулированного пористого кремния и подобных гетерофазных системах/ Демидов Е.С., Демидова Н.Е., Карзанов В.В., Марков К.А., Сдобняков В.В.// ФТТ.- 2009.- Том 51; № 10, - С. 1894-1900.

3. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов.-М.: Наука, 1965.- 340 с.
4. Patent USA, N: US 6,266,181 B1. 24. 07. 2001. Tellurite Glass, Optical amplifier, and Light Source. Assignee: Nippon Telegraph and Telefon Corporation, Shinjuku-ku (JP). / Ohishi Y.; Mori A.; Yamada M.; Ono H.; Kanamori T.; Shimada T.
5. Демидова Н.Е. Транспорт тока, ЭПР и фотолюминесценция в пористом кремнии: Дисс. кандидата физ.-мат. наук.- Н.Новгород 2010.-143с.
6. Люминесцентные свойства пористого кремния, сформированного на n+- и p+ - монокристаллах, легированных ионной имплантацией бора или фосфора/ Е.С. Демидов, И.С. Рассолова, О.Н. Горшков, В.К. Васильев, М.О. Марычев, А.Н. Михайлов, Д.И. Тетельбаум, С.А. Филиппов// Вестник ННГУ, сер. Физика твёрдого тела.- 2007.- № 6. - С. 22-27.
7. Control of photoluminescence properties of Si nanocrystals by simultaneously doping n- and p-type impurities/ M. Fujii, Y. Yamaguchi, Y. Takase, K. Ninomiya, S. Hayashi// Appl. Phys. Lett. - 2004. - Vol.85, №7. - P.1158-1160.
8. Влияние интенсивности торможения ионов на дефектообразование при имплантации в нанокристаллы кремния/ Г.А. Качурин, С.Г. Черкова, Д.В. Марин, А.К. Гутаковский, А.Г. Черков, В.А. Володин// ФТП. - 2008. - Том 42; №9. - С.1145-1149.
9. The Stopping and Range of Ions in Matter/ J.F. Ziegler. – Режим доступа: <http://www.srim.org>, свободный. – Загл. с экрана.

Публикации по теме диссертации

- 1А. Фотолюминесценция пористого кремния, пропитанного вольфрам-теллуридным стеклом с примесями редкоземельных металлов/ Демидов Е.С., Михайлов А.Н., Белов А.И., **Карзанова М.В.** и др.// ФТТ. - 2011. – Т.53; №12. - С. 2294-2298.
- 2А. Применения методов многофакторного анализа для оптимизации состава вольфрамовотеллуридного стекла по люминесцентным характеристикам/ Чигиринский Ю.И., **Карзанова М.В.**, Калинина Ю.И. и др. // Физика и химия стекла. – 2012. – Т.38; №5. - С.642-652.
- 3А. Влияние предварительного окислительного отжига на свойства пористого кремния, пропитанного вольфрам-теллуридным стеклом, активированным Er и Yb /Демидов Е.С., **Карзанова М.В.**, Чигиринский Ю.И. и др. // ФТТ. - 2013. – Т.55; № 2. - С.265-269.
- 4А. **Карзанова, М.В.** Определение оптимального состава стекла и оптимальных условий ВЧ-магнетронного осаждения плёнок на его основе/ **М.В. Карзанова**, Ю.И. Калинина// Тезисы докладов XV Нижегородской сессии молодых учёных, естественнонаучные дисциплины. - Нижний Новгород, 18-23 апреля 2010 г. - С.74-75.
- 5А. Чигиринский, Ю.И. Исследование люминесцентных свойств вольфрам-теллуридных стёкол методом многофакторного эксперимента/ Ю.И. Чигиринский,

- М.В. Карзанова**, Ю.И. Калинина// Материалы 16-й Всероссийской конференции студентов-физиков и молодых учёных. - г. Волгоград, 22-29 апреля 2010г. - С. 338-339.
- 6А. Чигиринский, Ю.И. Определение состава вольфрам-теллуридного стекла/ Ю.И. Чигиринский, **М.В. Карзанова**, Ю.И. Калинина // Сборник трудов Девятой Всероссийской конференции с элементами молодёжной научной школы: “Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики”. - г. Саранск, 5-8 октября 2010г. - С.133.
- 7А. Чигиринский, Ю.И. Применение многофакторного эксперимента для определения оптимального состава/ Ю.И. Чигиринский, **М.В. Карзанова**, Ю.И. Калинина // Тезисы докладов XI Всероссийской молодёжной школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества. - г. Екатеринбург, 15-21 ноября 2010г.- С.109.
- 8А. Влияние предварительного отжига на люминесцентные и электрофизические свойства структур: пористый кремний с вплавленным теллуридным стеклом с примесями редкоземельных элементов/ **М.В. Карзанова**, Е.А. Европейцев, Е.С.Демидов, Ю.И. Чигиринский// Материалы 17-й Всероссийской конференции студентов-физиков и молодых учёных. - г. Екатеринбург, 25 марта – 1 апреля 2011г. - С. 186-187.
- 9А. **Карзанова, М.В.** Влияние предварительного отжига на люминесцентные и электрофизические свойства пористого кремния с примесями редкоземельных элементов/ **М.В. Карзанова**, Е.А. Европейцев// Материалы XLIX Международной научной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс”. - г. Новосибирск, 16-20 апреля 2011г. - С. 215.
- 10А. Стёкла на основе оксидов V-VI групп. Оптические и полупроводниковые свойства/ И. А. Гришин, О. Н. Горшков, Е. С. Демидов, **М.В. Карзанова** и др. // Тезисы докладов XIV Всероссийской конференции и VI Школы молодых учёных “Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение”. - Нижний Новгород, ИХВВ РАН, 30 мая – 2 июня 2011г. - С. 27-28.
- 11А. Фотолюминесцентные и электрофизические свойства пористого кремния с примесями редкоземельных элементов / **М.В. Карзанова**, Е.С. Демидов, Е.А. Европейцев, Ю. И. Чигиринский // Тезисы докладов XVI Нижегородской сессии молодых учёных, естественнонаучные дисциплины. - Нижний Новгород, 18-22 апреля 2011 г. - С 110.
- 12А. Влияние предварительного отжига на свойства пористого кремния с примесями редкоземельных элементов/ **М.В. Карзанова**, Е.А. Европейцев, Е.С. Демидов, Ю. И. Чигиринский. //Тезисы докладов VIII Международной конференция и VII Школы молодых ученых и специалистов «КРЕМНИЙ 2011». - Москва, НИТУ «МИСиС», 5-8 июля 2011г. - С. 162.

- 13А. Влияние ионного облучения и примесей редкоземельных элементов на свойства пористого кремния / Е.С. Демидов, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, В.В. Карзанов, **М.В. Карзанова** и др.// Труды XIII Международной конференции “Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы”, Ульяновск 2011, 19-26 сентября - С. 67-68.
- 14А. Влияние предварительного отжига на свойства пористого кремния с примесями редкоземельных элементов эрбия и иттербия/ **М.В. Карзанова**, Е.А. Европейцев, Е.С. Демидов, Ю.И. Чигиринский// Сборник трудов Десятой Всероссийской конференции с элементами молодёжной научной школы: “Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики” - г. Саранск, 4-7 октября 2011 - С.80.
- 15А. Свойства пористого кремния с примесями редкоземельных элементов на имплантированном ионами фосфора кремнии/ Е.С. Демидов, А.Н.Михайлов, А.И. Белов, **М.В. Карзанова** и др.// Труды XV Международного симпозиума “Нанофизика и наноэлектроника” - Н. Новгород, ИФМ РАН, 14-18 марта 2011г. - Т.2, С.405-406.
- 16А. Влияние облучения ионами инертных и электрически активных элементов на люминесцентные свойства пористого кремния, пропитанного вольфрам-теллуридным стеклом с примесями Er и Yb/ Е.С. Демидов, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, В.В. Карзанов, **М.В. Карзанова** и др.// Труды XVI Международного симпозиума “Нанофизика и наноэлектроника” - Н. Новгород, ИФМ РАН, 12-16 марта 2012г. - Т2, С.225-226.
- 17А. Возможности усиления ИК-люминесценции пористого кремния/ **М.В. Карзанова**, Е.С. Демидов, Ю.И. Чигиринский, Е.А. Европейцев// Труды V Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых учёных по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур». - г. Рязань, 17-20 сентября 2012 г. - С.70-73.
- 18А. ИК-люминесценция пористого кремния с примесями редкоземельных элементов/ **М.В. Карзанова**, Е.С. Демидов, Ю.И. Чигиринский, Е.А. Европейцев// Тезисы докладов XIII Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества. - г. Екатеринбург, 7-4 ноября 2012 г. - С.237.
- 19А. Влияние облучения ионами Ag^+ , Ne^+ , P^+ пористого кремния, пропитанного вольфрам-теллуридным стеклом с примесями Er и Yb, на его структуру и люминесцентные свойства/ Е.С. Демидов, **М.В. Карзанова**, А.Н. Михайлов и др.// Труды XVII международного симпозиума “Нанофизика и наноэлектроника”. - Н.Новгород, ИФМ РАН 11-15 марта 2013г. - Т1, С.427-428.