

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Кубиси Мохамед Сайед Ибрагим

**ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ДЕФЕКТЫ В СТЕКЛООБРАЗНОМ
ДИОКСИДЕ КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННОМ ИОНАМИ РЕНИЯ**

1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена на кафедре экспериментальной физики и в научно-исследовательской лаборатории «Физика функциональных материалов углеродной микро- и оптоэлектроники» Физико-технологического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

**Научный
руководитель:** кандидат технических наук, доцент,
Зацепин Анатолий Федорович

**Официальные
соопоненты:** **Соколов Виктор Иванович,**
доктор физико-математических наук, старший научный
сотрудник, ФГБУН Институт физики металлов имени
М.Н. Михеева Уральского отделения Российской
академии наук, г. Екатеринбург, главный научный
сотрудник лаборатории оптики металлов;

Зуев Михаил Георгиевич,
доктор химических наук, профессор, ФГБУН Институт
химии твердого тела Уральского отделения Российской
академии наук, г. Екатеринбург, главный научный
сотрудник лаборатории оксидных систем;

Спирина Альфия Виликовна,
кандидат физико-математических наук, ФГБУН Институт
электрофизики Уральского отделения Российской
академии наук, г. Екатеринбург, старший научный
сотрудник лаборатории квантовой электроники.

Защита состоится « 28 » января **2022** г. в **15:00** ч на заседании
диссертационного совета УрФУ 1.3.02.06 по адресу: 620002, г. Екатеринбург,
ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=3044> .

Автореферат разослан « ___ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ищенко Алексей Владимирович

Актуальность темы исследования

Актуальность исследований ионно-легированных оксидов определяется логикой развития современной физики конденсированного состояния и постоянно растущими потребностями в создании новых функциональных материалов для фотоники и оптоэлектроники.

Диоксид кремния в кристаллической и стеклообразной формах играет фундаментальную роль в большинстве современных технологий [1, 2]. Наиболее распространенной формой кристаллического SiO_2 является α -кварц, который считается ключевым материалом для высокоточных генераторов и стандартов частоты. Среди некристаллических модификаций SiO_2 важное место занимает оптическое кварцевое стекло, различные марки которого имеют самые широкие области практического применения. Стеклообразный SiO_2 используется, в частности, в качестве материала оптических волокон с низкими потерями, в системах трансмиссионной и интегральной оптики, в оптоэлектронике и нанофотонике [1, 2]. Функциональные свойства указанного материала могут быть существенно улучшены, а область практических приложений значительно расширена за счет применения специальной ионно-лучевой обработки.

Ионная имплантация является эффективным способом модификации структуры и электронно-оптических свойств и функциональных материалов на основе SiO_2 [3, 4]. Воздействие ионного пучка на структуру стеклообразного SiO_2 приводит к созданию радиационных дефектов и примесных центров, инициирует их кластеризацию при высокодозном облучении [5, 6]. При этом возникающие структурные нарушения и оптически активные центры вносят новые «дефектные» состояния в электронный энергетический спектр исходной матрицы кварцевого стекла. Природа легирующих элементов также играет важную роль, позволяя направленно регулировать характеристики зонной энергетической структуры и, соответственно, комплекс электронно-оптических свойств материала [7-10]. Примесные ионы и точечные дефекты формируют сложные комплексы, создавая новые селективные и неселективные полосы оптического поглощения (ОП), фотолюминесценции (ФЛ). В свою очередь это приводит к изменению показателя преломления, возникновению дополнительных центров локализации носителей заряда и, в конечном счёте, к модификации оптических свойств материала [11, 12].

В этом плане для оптоэлектронных и фотонных применений весьма перспективным легирующим элементом является рений. Рений относится к переходным 5d-элементам шестого ряда VII группы с широким диапазоном

степеней окисления (+2, +3, +4, +5, +6, +7). В диоксиде кремния, имплантированном рением, можно ожидать большое разнообразие дефектных состояний из-за его поливалентности, что указывает на дополнительные возможности управления свойствами стеклообразного SiO_2 .

Основной проблемой для практического использования рения как модифицирующего элемента в технологии оптического материаловедения и приборостроения является ограниченность либо полное отсутствие необходимых данных о локальной структуре, электронных состояниях и оптических свойствах точечных дефектов и элементарных возбуждений в аморфных модификациях SiO_2 , легированных ионами рения. Указанная ситуация характерна как для материалов, получаемых методами традиционных технологий, так и, в наибольшей степени, для кварцевых стекол после ионно-лучевого воздействия.

Таким образом, актуальность получения детальной и достоверной информации о свойствах оптически активных дефектов в стеклообразном диоксиде кремния, имплантированном ионами рения, явилась определяющим фактором для постановки цели и задач настоящей работы.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время существует множество работ, посвящённых особенностям атомной и энергетической структуры SiO_2 , роли дефектов в формировании электронно-оптических свойств [7-12]. Много внимания уделяется кислородно-дефицитным центрам (Si-ODC(I) , Si-ODC(II) , Si-E') [7-9], в том числе и центрам, сформированным добавками (Ge-ODC , Sn-ODC) [9, 13]. Вместе с тем, в подавляющем большинстве работ легирование стёкол осуществляется на этапе их изготовления путём внесения добавок через расплав, тогда как исследования, посвященные ионной имплантации кварцевых стёкол, представлены в значительно меньшей степени.

Существует ряд ведущих научных центров в России и за рубежом, осуществляющих спектроскопические исследования кварцевых стекол, имплантированных различными ионами. Исследуется влияние ионов C, Si, Pb, Sn, Li, Na, K, Co [3-6, 13-17] и других элементов. Однако работы, посвященные воздействиям ускоренных ионов Re на SiO_2 , весьма ограничены и принадлежат они, в основном, коллективу исследователей из УрФУ [5, 16].

Результаты опубликованных фундаментальных и прикладных исследований спектрально-люминесцентных свойств кристаллических, аморфных и стеклообразных модификаций SiO_2 с различными добавками указывают на еще нереализованный потенциал для создания новых

эффективных устройств передачи и преобразования энергии, лазерных и светодиодных источников излучения, экранов, оптических датчиков, сенсоров и солнечных элементов [18].

Однако, несмотря на доступные публикации, ещё остаются неизвестными многие закономерности влияния локальной атомной структуры, элементного состава, условий синтеза и степени разупорядочения матрицы диоксида кремния, имплантированной тяжелыми ионами, включая Re, на функциональные свойства материала и закономерности фотоиндуцированных процессов. В том числе на передачу энергии, а также на взаимосвязь между локальной атомной структурой и оптическими свойствами модифицированных ионами дефектных центров.

В целом, имеющаяся в настоящее время информация не позволяет оптимизировать многие важные в практическом смысле характеристики материалов. В связи с этим возникает необходимость в систематическом изучении и анализе энергетической структуры SiO_2 , природы и электронно-оптических свойств элементарных возбуждений в кварцевых стеклах, имплантированных рением, с контролем дефектности, концентрации внедренных ионов и стабильности их спектрально-люминесцентных характеристик.

Поэтому настоящая работа направлена на изучение свойств оптически активных точечных дефектов, создаваемых в стеклообразном диоксиде кремния в результате имплантации ионов рения и их взаимодействия с матрицей.

Цель и задачи работы

Целью диссертации является комплексное изучение оптических свойств точечных дефектов в стеклообразном диоксиде кремния, имплантированном ионами рения, и их спектрально-люминесцентных параметров, изменяющихся при пост-имплантационных воздействиях.

Для достижения цели работы решались следующие задачи:

1. Выполнить анализ литературных данных по кварцевым стёклам различного типа и возникающим в них собственным и примесным дефектам.
2. Методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и SRIM-моделирования выполнить аттестацию образцов кварцевого стекла, имплантированных ионами Re с энергиями 30 и 80 кэВ.
3. Исследовать свойства кварцевого стекла, имплантированного ионами Re, методом оптической спектроскопии, установить особенности изменения структуры стекла под действием ионных потоков.

4. На основе экспериментальных данных (оптическое поглощение, фотолюминесценция, электронный парамагнитный резонанс, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия) получить информацию о дефектах SiO_2 , возникших при ионно-лучевом воздействии до и после термического отжига.
5. Выполнить сравнение спектрально-люминесцентных характеристик Re-модифицированных ODC-центров и аналогичных дефектов в стеклах SiO_2 , имплантированных другими тяжелыми ионами.

Научная новизна:

1. Впервые в стеклообразном SiO_2 , имплантированном Re, определены значения параметров межзонных переходов, величины соответствующих энергетических щелей.
2. Впервые изучены особенности разупорядочения атомной структуры стеклообразного SiO_2 при имплантации ионами Re и их влияние на формирование оптических свойств имплантированных образцов.
3. Впервые в образцах стеклообразного диоксида кремния, имплантированных ионами рения, обнаружены новые модификации кислородно-дефицитных оптически активных центров: Re-ODC (I) и Re-ODC (II). Получены данные об особенностях их энергетической структуры.
4. Впервые выполнен сравнительный анализ особенностей спектрально-люминесцентных характеристик Re-модифицированных ODC-центров и аналогичных дефектов в стеклах SiO_2 , имплантированных ионами Bi и Gd.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты настоящей работы расширяют существующие представления о физике оптических явлений с участием ионно-модифицированных дефектов стеклообразного SiO_2 , подвергнутого воздействию потоков ускоренных ионов с различными энергиями и флюенсами.

Полученные данные об оптических свойствах кварцевого стекла, имплантированного ионами Re, представляют интерес для разработки функциональных материалов высоко интегрированных планарных фотонных структур и оптоэлектронных приборов.

Реализованный в ходе работы подход к исследованию кинетических, спектрально-оптических и люминесцентных свойств может быть адаптирован для дальнейшего системного изучения структурно-чувствительных оптических эффектов в диоксиде кремния и его аналогов, имплантированных ионами различного типа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модификация кварцевых стекол различного типа ускоренными ионами Re приводит к увеличению общего структурного беспорядка, степень которого зависит от типа матрицы, энергии ионного пучка и проявляется в виде размытия зонных хвостов и уменьшения энергетической щели.
2. Имплантация ионами Re создаёт в стеклообразной матрице SiO₂ модифицированные диамагнитные кислородно-дефицитные центры типа Re-ODC(I), Re-ODC(II) с изменёнными спектрально-кинетическими параметрами и энергиями внутрицентровых оптических переходов.
3. Термический отжиг образцов SiO₂, имплантированных ионами Re, вызывает процесс конверсии парамагнитных дефектов типа E'-центров, что приводит к дополнительному увеличению концентрации модифицированных диамагнитных Re-ODC.
4. В результате имплантации тяжелых ионов в стеклообразном SiO₂ преимущественно возникают кислородно-дефицитные дефекты M-ODC(I) и M-ODC(II). Тип внедряемых ионов (переходных, редкоземельных и типичных элементов) определяет преимущественно количественные особенности энергетической структуры дефектов.

Степень достоверности результатов работы обеспечивалась за счёт использования сертифицированных образцов, точного экспериментального оборудования, современных и независимых аналитических методов обработки экспериментальных результатов, а также соответствия известным литературным данным.

Апробация результатов. Основные результаты настоящей работы докладывались и обсуждались на 7-и Международных и 2-х Всероссийских конференциях, съездах, семинарах.

Международные: 12th International «Symposium on SiO₂, Advanced Dielectrics and Related Devices Location» (Bari, ITALY, 2018 г), 5th International School and Conference on «Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures» (Saint Petersburg OPEN, Россия, 2018), VI Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2019» (Екатеринбург, Россия, 20-24 мая 2019 г.), XXIII Уральская международная зимняя школа по «физике полупроводников UIWSPS-2020» (Екатеринбург, Россия, 2020г), VII Международная молодежная научная конференция. «Физика Технологии Инновации. ФТИ-2020» (Екатеринбург Россия, 18-22 мая 2020 г), Международная научная конференция «Новые материалы и гелиотехнологии» (Институт материаловедения Академии наук, Ташкент Узбекистан, 20-21 мая 2021 г), VIII Международная молодежная

научная конференция «Физика Технологии Инновации. ФТИ-2021» (Екатеринбург, Россия, 17-21 мая 2021 г).

Всероссийские: VII Всероссийская конференция и школа молодых ученых и специалистов Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (Нижний Новгород 7-9 ноября 2018), Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам спектроскопии комбинационного рассеяния света (Новосибирск: 28 мая - 1 июня 2018).

Личный вклад автора

Цель работы сформулирована научным руководителем, постановка задач выполнена руководителем при участии автора диссертации.

Автор выполнил комплекс спектроскопических измерений оптического поглощения и фотолюминесценции, рассчитал динамику релаксационных процессов, проанализировал и интерпретировал экспериментальные результаты и сформулировал выводы. Автор принимал активное участие в подготовке совместных научных публикаций и докладов на конференциях.

Экспериментальные исследования люминесценции и оптического поглощения образцов, имплантированных Re с энергией 30 кэВ были проведены при участии к.ф.-м.н. Бирюкова Д.Ю., к.ф.-м.н. Кузнецовой. Экспериментальные исследования методом РФЭС выполнены к.ф.-м.н. Зацепиным Д.А.

Публикации. Автор опубликовал 18 работ, непосредственно связанных с электронно-оптическими свойствами ионно-имплантированных кварцевых стекол, из них 9 статей в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ и включенных в международную базу данных Web of Science и Scopus; 9 тезисов, представленных на Международных и Всероссийских конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 141 страниц, включая 52 рисунков, 15 таблиц и библиографический список из 193 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, показаны научная новизна полученных результатов и их практическая значимость, представлены защищаемые положения, апробация работы и структура диссертации.

В 1-й главе «Точечные дефекты номинально чистого и легированного кварцевого стекла» дан обзор исследований электронной структуры аморфного и стеклообразного диоксида кремния. Описаны типы

кварцевых стекол, методы получения и свойства «сухого» и «влажного» SiO_2 . В частности, показано, что атомная структура идеальной решетки кварцевого стекла определяется ближним и средним порядком. Матрица реального кварцевого стекла характеризуется наличием различных дефектов структуры ближнего и среднего порядка, что существенно влияет на электронно-оптические свойства материала.

Выполнен обзор всех разновидностей собственных дефектов точечного и континуального происхождения в реальной сетке кварцевого стекла. Рассмотрены основные спектрально-люминесцентные характеристики собственных дефектов и их взаимосвязь с электронной структурой материала. Выполненный обзор показывает, что точечные дефекты чистого кварцевого стекла оказывают определяющее влияние на оптические свойства материала, а следовательно, их модификация может быть использована для управления электронно-оптическими свойствами SiO_2 . С учетом проведенного литературного обзора сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во 2-й главе «Образцы и экспериментальные методики» приведено описание технологии синтеза объектов исследования, измерительных установок и экспериментальных методик.

Образцы SiO_2 были представлены тремя типами стёкол марок КИ, КУВИ и Hongan (China, Hongan Silica Glass Store). Образцы были облучены ионами Re на установках MEVVA (Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург) и «Радуга-3М» (Физико-технический институт, Госуниверситет, Нижний Новгород) в импульсно-периодическом режиме.

1. Образцы стекла КУВИ (10×10 мм, толщина 1,5 мм), относящиеся к IV типу, имплантировались ионами Re с энергией 30 кэВ на установке типа MEVVA (Институт Электрофизики. УрО РАН, Екатеринбург). Пучок ионов рения генерировался в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульса 0.4 мс и частотой следования 25 Гц. Используемые плотности потока ионов составляли 5×10^{15} , 10^{16} , 5×10^{16} , 10^{17} и 5×10^{17} см^{-2} .

2. Стекла марки КИ 10×10 мм² и толщиной 0,5 мм, имплантировали ионами Re с энергией 80 кэВ на ионно-плазменном источнике «Радуга-3М» (Физико-технический институт, Национальный исследовательский университет имени Н.И.Лобачевского, Нижний Новгород) в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульса 0.2 мс и частотой следования импульсов 30 Гц. Используемые плотности потока ионов составляли 5×10^{16} , 10^{17} и 2.5×10^{17} см^{-2} . Термический отжиг имплантированных образцов проводился на воздухе при 1000 °С в течение 1 ч. Для аттестации

полученных образцов использовалась рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Измерения проводились на РФЭС-спектрометре Thermo Scientific™ K-Alpha+™.

Для оценки влияния типа ионов на свойства кварцевых стёкол различных марок дополнительно использовались образцы стекла Hongan китайского производства (Hongan Silica Glass Store), имплантированные различными флюенсами ионов висмута с энергией 30 кэВ.

Для изучения спектральных и люминесцентных свойств применялась спектроскопия оптического поглощения, люминесцентная спектроскопия и криогенные измерения на установках лаборатории «Фотоника и ВУФ-спектроскопия» кафедры ФМПК Физико-технологического института УрФУ. Спектры оптического поглощения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов регистрировались на спектрофотометре Perkin Elmer Lambda 35, снабженном интегрирующей сферой. Спектры фотолюминесценции и возбуждения фотолюминесценции регистрировались в импульсном режиме на спектрометре Perkin Elmer LS 55. Для исследования дефектных E'-центров в кварцевом стекле, имплантированном ионами Re, использовалась ЭПР спектроскопия высокого разрешения на спектрометре ELEXSYS 580. Спектры оптического поглощения в ВУФ диапазоне и фотолюминесценции при ВУФ возбуждении получены с использованием многофункционального спектроскопического комплекса McPherson VuVAS 1000 PL, оснащенного гелиевым криостатом. Температура образцов варьировалась в диапазоне 8-500 К.

В 3-й главе «Оптические и люминесцентные свойства кислородно-дефицитных центров в стекле КУВИ, имплантированном 30 кэВ ионами Re» исследованы процессы, связанные с формированием люминесцентно-оптических свойств и электронных состояний кислородно-дефицитных дефектов в матрице стеклообразного SiO₂. На рисунке 1 показан разностный спектр оптического поглощения (ОП), измеренный в кварцевом стекле, имплантированном ионами рения с флюенсом 10¹⁷ см⁻². Спектр был разложен на простейшие гауссовы составляющие для выделения основных полос поглощения. Выявлено, что спектр ОП исследуемых образцов содержит восемь полос, четыре из которых: 5.1, 5.8, 7.0 и 7.5 eV могут быть отнесены к разновидностям кислородно-дефицитных центров [9]. Оптическую полосу 5.8 eV – связывают с трёхкоординированным атомом кремния (). За полосы 5.1 и 7.0 eV отвечают дивакансии кислорода Si-ODC(II), 7.5 eV – нейтральной кислородной вакансии Si-ODC(I). А полоса 6.3 эВ обусловлена центрами, связанными с ионами Re.

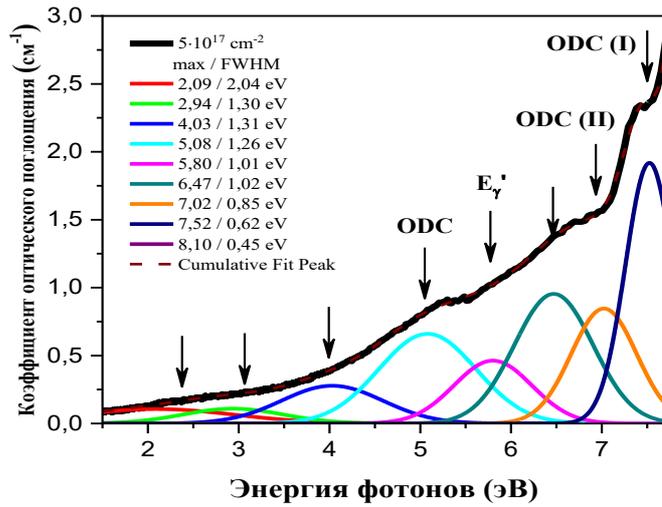


Рисунок 1. Разностный спектр ОП кварцевых стекол KUVI, имплантированных ионами рения с флюенсом $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$.

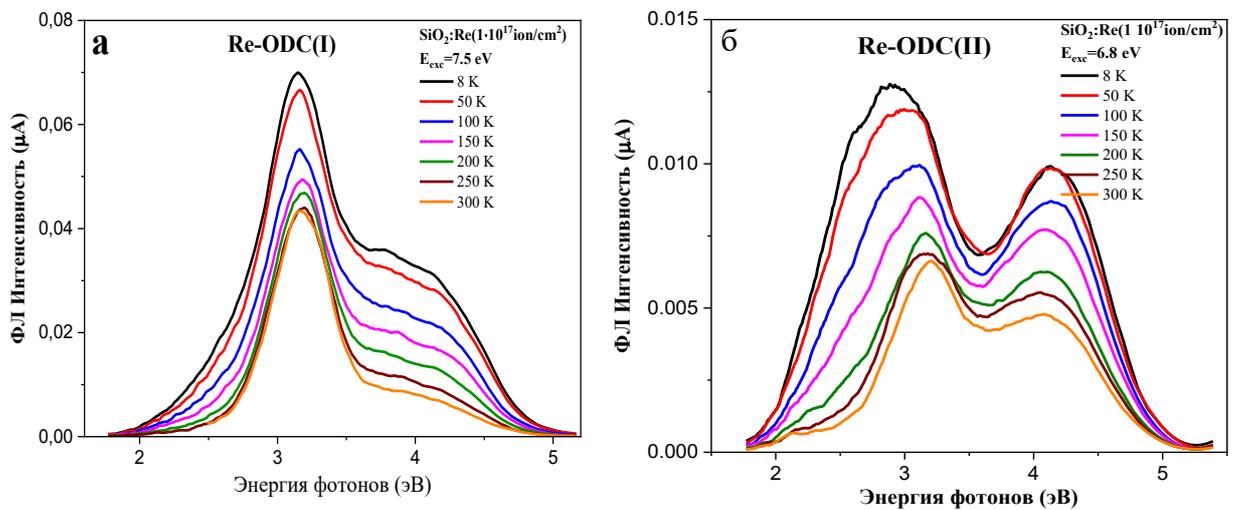


Рисунок 2. Спектры ФЛ кварцевых стекол KUVI, имплантированных ионами Re с флюенсом 10^{17} cm^{-2} , измеренные в интервале температур 8.2 – 300 К: (а) – при энергии возбуждения 7.5 эВ; (б) – при энергии возбуждения 6.8 эВ.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) SiO_2 , имплантированного Re, полученные при энергии возбуждения 7.5 эВ, обычно характерной для центров Si-ODC (I), показаны на рисунке 2а. Максимумы люминесценции наблюдаются при 3.2 и 3.7 эВ. При возбуждении 6.8 эВ, характерного для центров Si-ODC (II), максимумы люминесценции расположены при 2.8 и 4.1 эВ (рисунок 2б). Разложение спектров на гауссовы компоненты позволяет выделить четыре элементарных полосы 2.67, 3.17, 3.63 и 4.17 эВ (Рисунок 3), отличающихся от соответствующих полос люминесценции известных Si-ODC (I) и Si-ODC (II) в чистом SiO_2 (таблица 1).

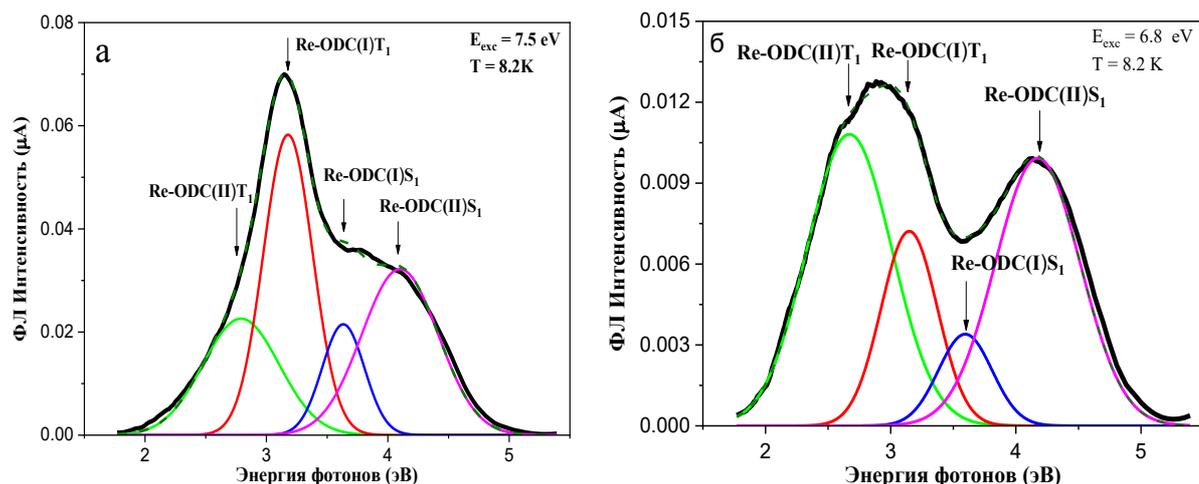


Рисунок 3. Разложение на гауссовы компоненты спектров ФЛ кварцевых стекол KUVI, имплантированных ионами Re с флюенсом 10^{17} см⁻², измеренных при температуре 8,2 К и энергиях возбуждения 7.5 эВ (а) и 6.8 эВ (б).

Полученные данные позволяют считать, что зарегистрированные кислородно-дефицитные центры представляют собой новый вариант дефектов, модифицированных ионами Re, которые обозначены как Re-ODC(I) и Re-ODC(II). Отличительная особенность модифицированных дефектов состоит в том, что энергия возбуждения практически совпадает с энергией возбуждения Si-ODC, тогда как излучательные переходы оказываются измененными. При варьировании температуры в интервале 8-300 К наблюдается температурное тушение люминесценции и дополнительное синее смещение полос излучения.

Таблица 1. Спектральные характеристики излучательных переходов в Re-ODC(I) и Re-ODC(II) центрах в интервале температур 8 – 500 К

Полосы ФЛ	<i>Re-ODC(II)-T₁</i>	<i>Re-ODC(I)-T₁</i>	<i>Re-ODC(I)-S₁</i>	<i>Re-ODC(II)-S₁</i>
Энергия возбуждения 7.5 эВ, SiO ₂ :Re				
	2.67-2.79 (2.7)	3.17-3.19 (3.1)	3.63-3.79 (4.3)	4.17-4.19 (4.4)
	0.76	0.47-0.52	0.41	0.76
Энергия возбуждения 6.8 эВ, SiO ₂ :Re				
	2.67-2.79 (2.7)	3.17-3.19 (3.1)	3.63-3.79 (4.3)	4.17-4.19 (4.4)
	0.76	0.47-0,52	0.41	0.76

Примечание: В скобках даны значения энергии излучательных переходов в центрах Si-ODC(I) и Si-ODC(II) в неимплантированной матрице SiO₂.

Полученные данные позволяют считать, что зарегистрированные кислородно-дефицитные центры представляют собой новый вариант дефектов, модифицированных ионами Re, которые обозначены как Re-ODC(I) и Re-ODC(II). Отличительная особенность модифицированных дефектов состоит в том, что энергия возбуждения практически совпадает с энергией возбуждения Si-ODC, тогда как излучательные переходы оказываются измененными. При варьировании температуры в интервале 8-300 К наблюдается температурное тушение люминесценции и дополнительное синее смещение полос излучения.

Для дальнейшего анализа спектры возбуждения ФЛ были экспериментально измерены при различных энергиях эмиссии фотонов (Рисунок 4).

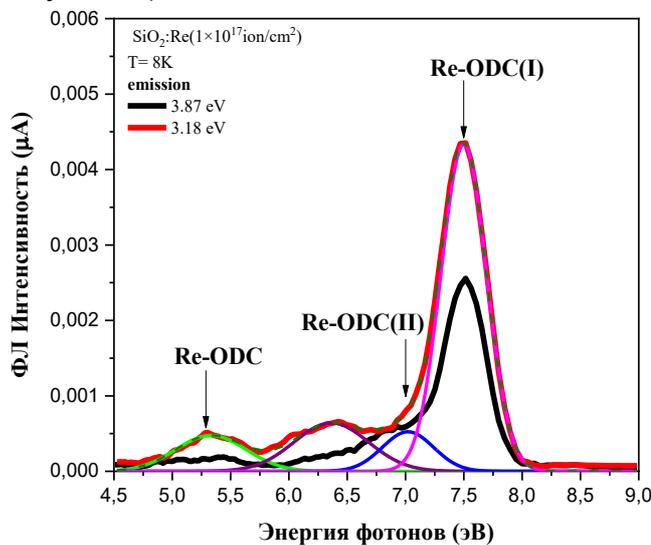


Рисунок 4. Спектры возбуждения ФЛ кварцевых стекол КУВИ, имплантированных ионами Re с флюенсом 10^{17} см $^{-2}$, измеренные при температуре 8 К.

Спектры возбуждения фотолюминесценции хорошо коррелируют с интенсивностью полос ФЛ 3.2 и 3.87, подтверждая кислородно-дефицитный тип центров ФЛ, модифицированных Re, ответственных за указанные полосы. При регистрации фотонов с энергиями 3.18 эВ полоса возбуждения ФЛ 5.3 эВ связана с синглет-синглетными переходами в $S_0 \rightarrow S_1$ в кислородно-дефицитных центрах Re-ODC (I) и Re-ODC (II), энергии перехода у которых близки по значению. Полосы 7 и 7.5 эВ связаны с переходами $S_0 \rightarrow S_2$ в Re-ODC (II) и Re-ODC (I), соответственно.

Таким образом, исследования люминесцентно-оптических свойств и электронных состояний кислородно-дефицитных дефектов в имплантированной матрице стеклообразного SiO $_2$ показывают, что модификация кислородно-дефицитных центров ионами Re приводит к уменьшению энергии синглет-синглетных и увеличению энергии триплет-синглетных излучательных переходов (табл. 1). В наибольшей степени смещаются уровни синглетных состояний, в меньшей – триплетных.

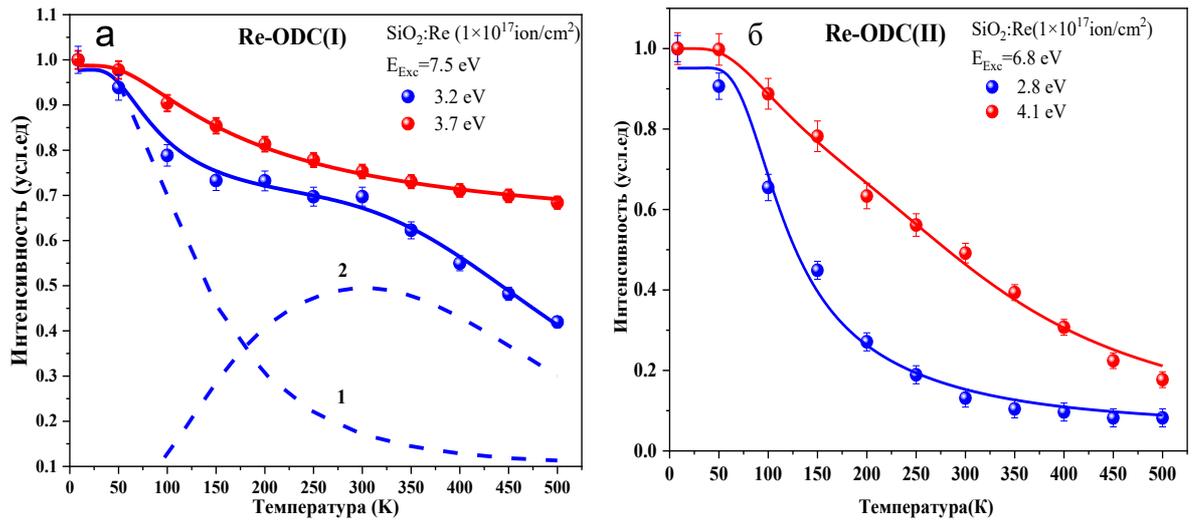


Рисунок 5. Температурные зависимости ФЛ кварцевых стекол, имплантированных ионами Re ($1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$), измеренные: (а) – при энергии возбуждения 7.5 эВ; (б) – при энергии возбуждения 6.8 эВ.

Температурные зависимости для всех полос люминесценции (Рисунок 5), судя по форме кривых описываются многостадийным законом, включающим наличие термоактивационных стадий [6], как в процессе фотовозбуждения, так и в ходе излучательной релаксации.

При исследовании и анализе статического беспорядка в матрице образцов кварцевого стекла, имплантированного ионами Re, был использован квазидинамический подход [16]. Найдено, что поведение края фундаментального поглощения образцов подчиняется «кристаллическому» правилу Урбаха: с ростом флюенса ионов наблюдаемое увеличение энергии $E_U(\Phi)$ коррелирует с уменьшением ширины запрещенной зоны материала. Отношение констант деформационных потенциалов ($D/K = 0.49$) для указанных величин остаётся постоянным, что свидетельствует о прямой взаимосвязи параметров $E_U(\Phi)$ и . Пропорциональное изменение энергии Урбаха и оптической щели, показывает, что эти оптические параметры материала отражают один и тот же процесс – увеличение протяженности зонных хвостов локализованных состояний, обусловленное структурным разупорядочением матрицы стекла.

В 4-й главе «Оптические и люминесцентные свойства кислородно-дефицитных центров в стекле КИ, имплантированном 80 кэВ ионами Re» было изучено формирование радиационных дефектов в поверхностном слое кварцевого стекла, имплантированного ионами рения повышенных энергий. Были обнаружены новые центры с полосой поглощения 4.77 эВ (FWHM = 0.45 эВ) и полосой люминесценции 2.9 эВ (Рисунок 6). Результаты

спектроскопических исследований показывают, что эти центры имеют другую энергетическую структуру по сравнению с описанными выше центрами Re-ODC(I) и Re-ODC(II). Происхождение новых центров, обозначенных как *Re-related*, предположительно связано с присутствием атомов Re в ближнем окружении люминесцирующих центров в SiO₂.

На рисунке 6 пик при 5.8 эВ (FWHM = 0.75 эВ) дает основной вклад в оптическое поглощение имплантированного SiO₂. Эта полоса принадлежит парамагнитному нелюминесцирующему E'-центру, представляющему собой оборванную связь кремния с неспаренным электроном ($\equiv\text{Si}\bullet$) [9, 10].

Спектр фотолюминесценции Re-ODC при осуществлении переходов $S_0 \rightarrow S_1$, соответствующих энергии 5 эВ, показан на рисунке 7. При указанном возбуждении спектр люминесценции представлен суперпозицией трех полос с максимумами при 3.2 эВ (FWHM = 0.4 эВ), 2.9 эВ (FWHM = 0.3 эВ) и 2.8 эВ (FWHM = 0.5 эВ). После термического отжига интенсивность фотолюминесценции Re-ODC и Re-related увеличивается более чем в три раза (Рисунок 7), при этом уменьшается концентрация E'-центров, как это видно из Рисунок 6б (врезка). Из этого следует, что термический отжиг образцов SiO₂, имплантированных ионами Re, вызывает процесс конверсии дефектов, приводящей к росту концентрации Re-ODC и Re-related за счёт уменьшения концентрации E'-центров.

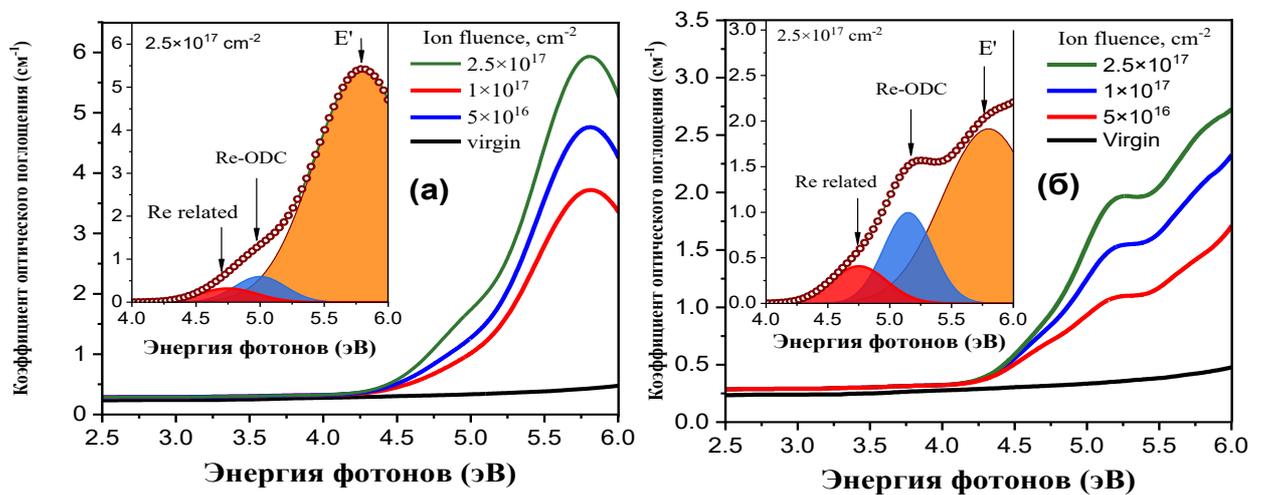


Рисунок 6. Спектры поглощения SiO₂, имплантированного ионами Re, при разных флюенсах ионов до (а) и после (б) термического отжига.

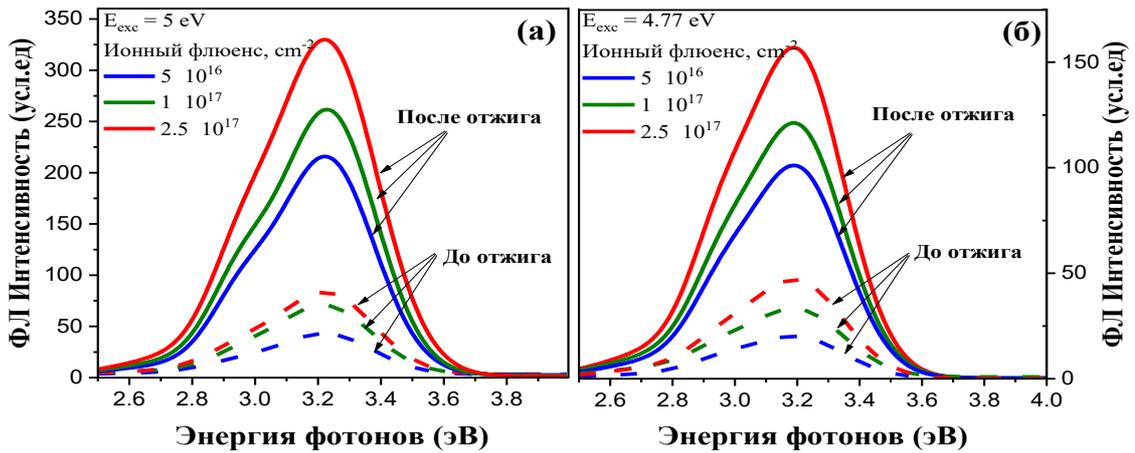


Рисунок 7. Интенсивность ФЛ SiO_2 , имплантированного рением, в зависимости от флюенса иона при термическом отжиге при возбуждении 5 эВ (а) и 4.77 эВ (б).

Результаты измерения кинетики ФЛ показывают, что Re-related характеризуется более коротким временем жизни по сравнению с триплетной ФЛ Re-ODC из-за большей силы осциллятора оптических переходов.

В 5-й главе «Оптические свойства кварцевых стекол, облученных тяжелыми ионами разного типа» выполнен сравнительный анализ результатов исследования матриц SiO_2 различного типа и дефектообразования в данных матрицах при имплантации ионов Re, Bi и Gd с энергией 30 кэВ и ионов Re с энергией 80 кэВ. В результате было установлено, что на профили распределения внедрённых ионов в большей степени влияет их энергия, в меньшей – радиус и масса (Рисунок 8).

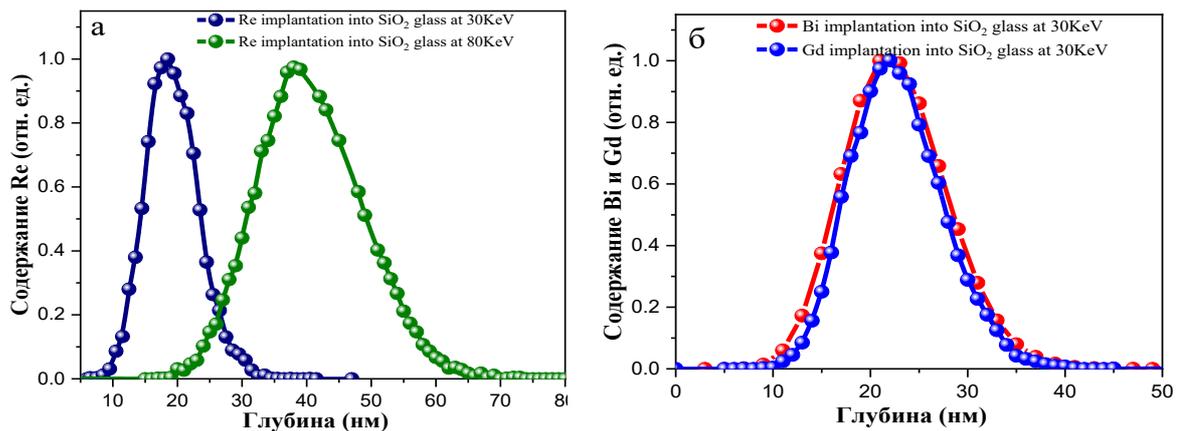


Рисунок 8. Моделирование методом SRIM глубин проникновения для: (а) ионов Re 30 кэВ и 80 кэВ в матрицы КУВИ- SiO_2 и КИ- SiO_2 , соответственно; (б) ионов Bi и Gd с энергией 30 кэВ в матрицы Nonan- SiO_2 и KUVI- SiO_2 , соответственно.

От энергии пропорционально зависит глубина проникновения ионов. Увеличение энергии также делает шире профиль распределения. При

уменьшении радиуса ионов и увеличении их массы профиль распределения также уширяется. Кроме того, ионная имплантация увеличивает степень структурного беспорядка и уменьшает величину запрещенной зоны (табл. 2). Наибольшая степень разупорядоченности и наименьшая радиационная стойкость была зафиксирована в кварцевых стеклах китайского производителя Hongan. Значения энергии Урбаха в этом стекле изменялись в диапазоне 0.355 – 0.582 эВ, причем нижнее значение соответствует исходному неимплантированному стеклу. Наиболее упорядоченной структурой отличается стекло КУВИ, энергия Урбаха в котором составляет лишь 0.130 эВ. Указанный тип стекла отличается также и наибольшей радиационной стойкостью. При имплантации ионами Re в диапазоне флюенсов 5×10^{15} – 5×10^{17} см⁻² энергия Урбаха увеличилась всего на 30 мэВ (таблица 2).

Таблица 2. Параметры кварцевого стекла, имплантированного Re при 30 кэВ и 80 кэВ, ионами Bi и Gd при 30 кэВ.

Тип	КУВИ: Re 30 кэВ	КИ: Re 80 кэВ	Hongan: Bi 30 кэВ	КУВИ: Gd 30 кэВ
Энергетическая щель E_g (эВ)	8.035*, (8.11)* 8.015 – 8.029	—	8.019*, (8.49)* 7.920 – 8.008	8.115*, (8.45)* 7.966 – 8.076
Энергия Урбаха E_U (мэВ)	(130±5)* (144 – 173)±5	—	(355±5)* (400 – 582) ±5	(130±5)* (295 – 405)±5

Примечание: * данные для неимплантированного стекла (в скобках указано значение щели по Урбаху).

Основным результатом сравнения процессов дефектообразования в матрицах SiO₂ при их имплантации ионами Re, Bi и Gd является установленный факт появления модифицированных дефектных центров M-ODC(I) и M-ODC(II), где M = Re, Bi или Gd. Их модификация данными ионами увеличивает энергию триплет-синглетных излучательных переходов и уменьшает энергию синглет-синглетных. При этом изменение спектральных параметров синглет-синглетной люминесценции дефектных центров типа M-ODC(I) происходит значительно более заметно, чем у центров M-ODC(II).

Другой важный результат состоит в том, что ионная имплантация приводит к возникновению Re-related центров с полосой возбуждения ФЛ 4.7-4.8 эВ, которая по своему положению может быть отнесена к поглощению центров немостикового кислорода (NBOHC). Однако энергия люминесцентных переходов данного дефекта составляет 2.53-2.58 эВ (табл. 3),

что на 0.6-0.7 эВ превышает энергию люминесценции NBOHC в чистом SiO₂. Можно предположить, что по аналогии с Re-модифицированными ODC указанный дефект представляет собой центр немостикового кислорода, модифицированный ионами рения. Как показывают наши исследования влияние ионов Re в локальном окружении люминесцирующих центров носит общий характер: полосы возбуждения ФЛ остаются без изменения, а энергия люминесцентных переходов изменяется на десятые значения электронвольт. Аналогичные эффекты возникновения в кварцевых стёклах модифицированных центров немостикового кислорода с изменёнными спектральными характеристиками наблюдались ранее в работе [19].

Следует также отметить, что энергию возбуждения 4.7-4.8 эВ, судя по всему, имеют два различных типа Re-related центров, связанных с полосами люминесценции 2.53 эВ или 2.9 эВ. Ионы Re с энергией 30 кэВ создают оба типа центров, а Re с энергией 80 кэВ – только второй, имеющий полосу люминесценции 2.9 эВ.

Таблица 3. Сравнение параметров M-related центров в кварцевых стеклах, имплантированных ионами Re с энергией 30 кэВ и 80 кэВ, ионами Bi и Gd с энергией 30 кэВ.

Энергия возбуждения эВ	Энергия излучательных переходов, эВ (полуширина, эВ)			
	КУВИ: Re 30 кэВ	КИ: Re 80 кэВ	Hongan: Bi 30 кэВ	КУВИ: Gd 30 кэВ
6.6-7, не прямое (ODC(II))	—	2.50-2.53 (0.31)	—	2.2 -2.3 (0.3)
5.15-5.2, не прямое (ODC)	2.85 (0.18), 2.53 (0.34), 2.28 (0.28)	2.92	3.08 (0.18)	—
4.7-4.8, внутрицентровое (M-related)	2.85 (0.18), 2.53 (0.24), 2.28 (0.27)	2.9 (0.3)	2.95 (0.11) 2.58 (0.19)	—

Примечание: M = Re, Bi или Gd (тип внедряемого иона).

Указанные полосы регистрируются также при энергиях возбуждения 5.15 эВ и 6.98 эВ, которые связаны с внутрицентровыми синглет-синглетными переходами в Re-ODC(II). Данный факт можно объяснить передачей энергии между Re-ODC(II) и центрами нового типа. Кроме того, имплантация ионов Bi

с энергией 30 кэВ также приводит к появлению обоих типов аналогичных дефектов. В спектре люминесценции наблюдаются полосы 2.58 эВ и 2.95 эВ, которые предположительно связаны с внедрёнными в матрицу SiO_2 ионами висмута.

В кварцевом стекле марки КУВИ, имплантированном ионами Gd также регистрируются центры нового типа, связанные с внедрёнными ионами. Полоса ФЛ 2.2 эВ появляется при энергии возбуждения 6.6 эВ и не может быть отнесена к какому-либо известному активному центру ФЛ в SiO_2 . Можно предположить, что данная полоса ФЛ связана с новой разновидностью оптических центров кислородно-дефицитного типа, модифицированных ионами Gd.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы:

1. Методами оптической, люминесцентной и ЭПР-спектроскопии установлено, что при ионно-лучевом воздействии на стекла SiO_2 происходит повреждение матрицы и возникновение собственных дефектов: E' -центры, NBOHC, ODC (I), ODC (II).
2. Вместе с известными дефектами, возникают новые кислородно-дефицитные центры, модифицированные ионами Re. К таковым относятся кислородные моновакансии Re-ODC(I) и дивакансии Re-ODC(II), в локальном окружении которых располагаются внедряемые ионы. Модификация структуры ближнего окружения дефектов приводит к снижению энергии синглет-синглетных внутрицентровых электронных переходов и возрастанию энергии синглет-триплетных переходов. В меньшей степени смещаются уровни триплетных состояний, в наибольшей – синглетных.
3. Имплантация ионами Re создаёт также специфические дефекты принципиально нового типа (обозначены как Re-related). Отдельная разновидность указанных дефектов предположительно представляет собой Re-модифицированный центр нестикового кислорода (Re-NBOHC). Электронная структура Re-related центров зависит от энергии внедряемых ионов: при имплантации ионов с энергией 30 и 80 кэВ полосы люминесценции имеют различные спектральные характеристики.
4. Воздействие тяжёлых ионов различного типа носит аналогичный характер: создаются дефекты типа M-ODC(I) и M-ODC(II) с изменённой энергетической структурой, где M – ионы-имплантаты (Re, Bi или Gd). При этом на величину сдвига люминесцентных полос влияет в основном радиус и масса внедряемых ионов.

5. Методами оптической спектроскопии установлены основные закономерности разупорядочения атомной структуры при имплантации кварцевых стёкол различными флюенсами тяжёлых ионов. Поведение края фундаментального поглощения облученного кварцевого стекла подчиняется «кристаллическому» правилу Урбаха. Ионно-лучевое воздействие приводит к увеличению общего структурного беспорядка стеклообразного SiO_2 , степень которого зависит от типа матрицы, энергии ионного пучка и проявляется в виде размытия зонных хвостов и уменьшения эффективной энергетической щели.
6. Наибольшая степень разупорядочения и наименьшая радиационная стойкость характерна для кварцевых стёкол Hongan китайского производителя, а наиболее упорядоченной структурой и, соответственно, более высокой радиационной стойкостью отличается отечественное особо чистое стекло КУВИ (тип IV).

Перспективы дальнейшего развития темы. Результаты работы являются предпосылками для дальнейшего развития физических основ создания новых функциональных материалов на базе некристаллического диоксида кремния и его аналогов, получаемых методами ионно-лучевых технологий и предназначенных для планарных структур и устройств фотоники и микро-, оптоэлектроники нового поколения.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Devine R. B. Structure and Imperfections in Amorphous and Crystalline Silicon Dioxide / R. A. B Devine, J. P. Duraud, E. Dooryhée // Wiley, New York. – 2000.
2. Griscom D. L. in The Physics and Chemistry of SiO_2 and Si- SiO_2 Interface / D. L. Griscom, D. B. Brown and N. S. Saks // Plenum, New York. – 1988.
3. Bogomolova L. D. Paramagnetic Species Induced by Ion Implantation of Pb^+ and C^+ Ions in Oxide Glasses / L. D. Bogomolova, V. A. Jachkin, S. A. Prushinsky, S.A. Dmitriev, S. V. Stefanovsky, Yu. G Teplyakov, F.Caccavale // J. Non-Cryst. Solids. – 1998. – V. 241. – P. 174 – 183.
4. Magruder R. H. Linear and Non-Linear Optical Properties of Lead Nanometer Dimension Metal Particles in Silica Formed by Ion Implantation / R. H. Magruder, R. A. Weeks, S. H. Morgan, Z. Panb, D. O. Henderson, R. A. Zuhrc // J. Non-Cryst. Solids. – 1995. – V. 192–193. – P. 546 – 549.
5. Zatsepin A. F. The MRO-Accompanied Modes of Re Implantation into SiO_2 -Host Matrix: XPS and DFT Based Scenarios / A. F. Zatsepin, D. A. Zatsepin, D. W.

Boukhvalov, N. V. Gavrilov, V. Ya. Shur, A. A. Esin // *J. Alloys Compd.* – 2017. – V. 728. – P. 759 – 766.

6. Zatsëpin A. F. The temperature behavior and mechanism of exciton luminescence in quantum dots. / A. F. Zatsëpin, D. Yu. Biryukov // *Physical Chemistry Chemical Physics.* – 2017. – V. 19. – P. 18721 –18730.

7. Devine R. A. B. The structure of SiO₂, its defects and radiation hardness / R. A. B. Devine // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1994. – V. 41.– P. 452 – 459.

8. Griscom D. L. Defects in SiO₂ and related dielectrics: Science and Technology/ G. Pacchioni, L. Skuja, D. L. Griscom // *Kluwer Academic, Dordrecht.* – 2000. – P. 73–117 and P. 117– 61.

9. Skuja L. Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide / L. Skuja // *J. Non-Cryst. Solids.* – 1998. – V. 239. – P. 16 –48.

10. Girard S. Overview of radiation induced point defects in silica-based optical fibers / S. Girard, A. Alessi, N. Richard, L. Martin-Samos, V. De Michele, L. Giacomazzi, S. Agnello, D. Di Francesca, A. Morana, B. Winkler, I. Reghioua, P. Paillet, M. Cannas, T. Robin, A. Boukenter, Y. Ouerdane // *Rev. Phys.* –2019. – V.4. – № 100032.

11. Teranishi, N. No Image Lag Photodiode Structure in the Interline CCD Image Sensor / N. Teranishi, A. Kohono, Y. Ishihara, E. Oda, K. Arai // *In Proceedings of the International Electron Devices Meeting, San Francisco, CA, USA, 13–15 December 1982.* – P. 324 –327.

12. Fossum, E.R. A Review of the Pinned Photodiode for CCD and CMOS Image Sensors / E.R. Fossum, D. B. Hondongwa // *IEEE J. Electron Devices Soc.* – 2014. – V. 2. – P. 33 –43.

13. Zatsëpin D.A. Sn-loss effect in a Sn-implanted a-SiO₂ host-matrix after thermal annealing: A combined XPS, PL, and DFT study / D. A. Zatsëpin, A.F. Zatsëpin, D.W. Boukhvalov, E.Z. Kurmaev, N.V. Gavrilov // *Applied Surface Science.* – 2016. – V. 367. – P. 320 – 326.

14. Zatsëpin A. F. Ionization effects in Si/SiO₂: Li, Na, K implanted structures under the impact of high-energy α particles / A. F. Zatsëpin, E. A. Buntov, A. I. Slesarev, D. Yu. Biryukov // *Journal of Surface Investigation.* – 2016. – V. 306 – P. 603- 607.

15. Zatsëpin A. F. Energy band gaps and excited states in Si QD/SiO_x/RyOz (R = Si, Al, Zr) suboxide superlattices / A F Zatsëpin, E A Buntov, D A Zatsëpin, E Z Kurmaev, V A Pustovarov, A V Ershov, N W Johnson, Alexander Moewes // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2019. – V. 31. – № 415301.

16. Zatsepin A.F. Quasi-Dynamic Approach in Structural Disorder Analysis: An Ion-Beam-Irradiated Silica. / A.F. Zatsepin, D.Y. Biryukov, D A Zatsepin, T.V. Shtang, N.V. Gavrilov // J. Phys. Chem. C. – 2019. – V. 123. – P. 29324 – 29330.

17. Green R. J. Electronic band gap reduction and intense luminescence in Co and Mn ion-implanted SiO₂ / R. J. Green, D. A. Zatsepin, D. J. St. Onge, E. Z. Kurmaev, N. V. Gavrilov, A. F. Zatsepin, and A. Moewes // Journal of Applied Physics – 2014. – V. 115. – № 103708.

18. Seddon, A. S. Progress in rare-earth-doped mid-infrared fiber lasers / A. S. Seddon, Z. Tang, D. Furniss, S. Sujecki, T. M. Benson // Optics Express. – 2010. – V. 18. – P. 26704 – 26719.

19. Зацепин А.Ф. Люминесценция модифицированных центров немолекулярного атома кислорода в щелочно-силикатном и кварцевом стеклах / А. Ф. Зацепин, В. Б. Гусева, Д. А. Зацепин // Физика и химия стекла. – 2008. – V.34. – P. 934 – 941.

**СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ
Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и
Аттестационным советом УрФУ:**

1. Parulin R. A. Optical properties and energy band parameters of luminescent CaMoO₄:Bi ceramics / R. A. Parulin, I. V. Timoshenko, Yu. A. Kuznetsova, A. F. Zatsepin, E. S. Buyanova, Z. A. Mikhaylovskaya, **M.S. I. Koubisy** // Journal of Physics Conference Series. – 2018. – V. 1124. – № 051005; 0,58 / 0,18 п.л. (Scopus).

2. Zatsepin A.F. Induced Quasi-Dynamic Disorder in a Structure of Rhenium Ion-Implanted Quartz Glass / A.F. Zatsepin, D.Y. Biryukov, N.V. Gavrilov, T.V. Shtang, R.A Parulin, **M.S. I. Koubisy** // Physics of the Solid State. – 2019. – V. 61. – P. 1017-1022; 0,69 / 0,18 п.л. (Web of Science, Scopus).

3. **Koubisy M.S. I.** Luminescence at VUV-excitation of oxygen-deficient centers in silica glass implanted with 80 keV Re-ions / **M.S. I. Koubisy** A.F. Zatsepin, Y.A Kuznetsova, D.Y. Biryukov, A.N Mikhaylov // AIP Conference Proceedings. – 2019. – V. 2174. – № 020224; 0,6 / 0,28 п.л. (Web of Science, Scopus).

4. Zatsepin A.F. Electronic Structure and Optical Absorption in Gd-Implanted Silica Glasses / A. Zatsepin, Y. Kuznetsova, D. Zatsepin, D. Boukhvalov, N. Gavrilov, **M.S. I. Koubisy** // Physica Status Solidi (a). – 2019. – V. 216. № 1800522; 0,69 / 0,2 п.л. (Web of Science, Scopus).

5. Zatsepin A.F. New optical oxygen-deficient centers in 80 keV Re-implanted amorphous silica / A.F. Zatsepin, Y.A. Kuznetsova, T.V. Shtang, A.N. Mikhaylov, **M.S. I. Koubisy** // J. Non-Cryst. Solids. – 2020. – V. 529. № 119775; 0,92 / 0,25 п.л. (Web of Science, Scopus).

6. **Koubisy M.S. I.** Optical Absorption and Luminescence of Oxygen-Deficient Centers in Silica Glass Implanted with 30 keV RE-Ions / **M.S. I. Koubisy**, A. F. Zatsepin, D. Yu. Biryukov, T. V. Shtang, N. V. Gavrilov // Conference Proceedings. – 2020. – V. 2313. – № 30020; 0,8 / 0,38 п.л. (Web of Science, Scopus).

7. Galiulina J. S. The formation of optically active centers in silica glass during implantation of bismuth ions / J. S. Galiulina, A. P. Mamonov, **M.S. I. Koubisy**, T. V. Shtang, D. Yu. Biryukov, N. V. Gavrilov, A.F. Zatsepin // AIP Conference Proceedings. – 2020. – V. 2313. – № 30015; 0,69 / 0,18 п.л. (Web of Science, Scopus).

8. **Koubisy M.S. I.** Ion-beam induced quasi-dynamic continual disorder in Bi-implanted Horgan silica glass / **M.S. I. Koubisy**, A.F. Zatsepin, D.Y. Biryukov, N.V. Gavrilov, D. A. Zatsepin, Shtang T.V. // J. Non-Cryst. Solids. – 2021. – V. 563. – №120818; 0,8 / 0,33 п.л. (Web of Science, Scopus).

9. **Koubisy M.S.I.** Novel borosilicate glass system: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-SiO}_2\text{-MnO}_2$: Synthesis, average electronics polarizability, optical basicity, and gamma-ray shielding features / **M. S. I. Koubisy**, E. A. Abdel Wahab, M. I. Sayyed, K. A. Mahmoud, A. F. Zatsepin, Sayed A. Makhlof, Kh. S. Shaaban // J. Non-Cryst. Solids. – 2021. – V. 553. № 120509; 1,27 / 0,33 п.л. (Web of Science, Scopus).

Тезисы:

10. Zatsepin A.F. Electronic structure and optical absorption in Gd-implanted silica glasses / A.F. Zatsepin, Yu.A. Kuznetsova, D.A. Zatsepin, N.V. Gavrilov, **M.S.I. Koubisy**, S.P. Vyatkina // Тезисы докладов 12th International Symposium on SiO_2 , Advanced Dielectrics and Related Devices Location. Bari, ITALY.–2018.– P. 97, 0,2 / 0,7 п.л.

11. Зацепин А.Ф. Ионно-лучевая модификация структуры и оптические свойства Gd-имплантированных слоев SiO_2 / А.Ф. Зацепин, Ю.А. Кузнецова, Д.А. Зацепин, Д.В. Бухвалов, Н.В. Гаврилов, **М. Кубиси** // Тезисы докладов VII Всероссийской конференции и школы молодых ученых и специалистов «Физические и физико-химические основы ионной имплантации». Нижний Новгород. – 2018. – С.41, 0,15 / 0,09 п.л.

12. **Кубиси М.** Эффект пространственного ограничения фононов в спектрах КРС наночастиц / **М. Кубиси**, Ю.А. Кузнецова, Зацепин А.Ф., Р.А. Парулин // Тезисы докладов Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам спектроскопии комбинационного рассеяния света. Новосибирск. – 2018. – С.43, 0,15 / 0,09 п.л.

13. **Koubisy M.S.I.** Photoluminescence of Oxygen-Deficient Centres in Re implanted Silica Glass / **M.S.I. Koubisy**, A.F. Zatsepin, D.Yu. Biryukov, A.N. Mikhailov, R.A. Parulin // Тезисы докладов VI Международной молодежной

научной конференции «Физика. Технологии. Инновации». (ФТИ-2019). Екатеринбург. – 2019. – С.117, 0,15 / 0,09 п.л.

14. **Koubisy M.S. I.** Optically-Active Centers in Re-Implanted Silica Glass / **M.S. I. Koubisy**, A.F. Zatsepin, D. Yu. Biryukov, A. S. Vagarov // Тезисы докладов XXIII Уральской международной зимней школы по физике полупроводников (UIWSPS-2020). Екатеринбург. – 2020. – С. 130, 0,4 / 0,18 п.л.

15. **Koubisy M.S. I.** Luminescence of Radiation Defects in Bi Implanted Silica Glass / **M.S.I. Koubisy**, A.F. Zatsepin, T.V. Shtang, D.Yu. Biryukov, N.V. Gavrilov, A.P. Mamonov // Тезисы докладов VII Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации». (ФТИ-2020). Екатеринбург. – 2020. – С. 220, 0,15 / 0,09 п.л.

16. Галиулина Ю.С. Оптические свойства стекол SiO₂, имплантированных ионами висмута / Ю.С. Галиулина, **М.С.И. Кубиси**, Т.В. Штанг, Д.Ю. Бирюков, А.Ф. Зацепин, Н.В. Гаврилов, А.П. Мамонов // Тезисы докладов VII Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации». (ФТИ-2020). Екатеринбург. – 2020. – С.328, 0,15 / 0,09 п.л.

17. **Koubisy M.S.I.** Temperature behavior of optical absorption edge in Bi-implanted silica glass Ions / **M.S.I. Koubisy**, A.F. Zatsepin, D.Yu. Biryukov, T.V. Shtang, N.V. Gavrilov, A.P. Mamonov // Тезисы докладов VIII Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации». (ФТИ-2021). Екатеринбург. – 2021. – С. 257, 0,15 / 0,09 п.л.

18. Бирюков Д.Ю. Модификация фотолюминесцентных свойств кислородно-дефицитных центров в стеклообразном SiO₂, имплантированном ионами рения / Д.Ю. Бирюков, А.Ф. Зацепин, **М.С.И. Кубиси**, Н.В. Гаврилов // Тезисы докладов Международной научной конференции «Новые материалы и гелиотехнологии». Паркент, Узбекистан. – 2021. – С. 82, 0,15 / 0,09 п.л.

Подписано в печать 26.11.2021 Формат 60x84 1/16

Бумага офсетная Печать офсетная Усл.печ.л. 1

Заказ №8030 Тираж 95экз.

Отпечатано в типографии

ООО «Издательство УМЦ УПИ»

Г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2

Тел.: (343) 362-91-16, 362-91-17