

## ОТЗЫВ

официального оппонента  
на диссертационную работу Кубиси Мохамед Сайед Ибрагима  
«ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ДЕФЕКТЫ В СТЕКЛООБРАЗНОМ  
ДИОКСИДЕ КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННОМ ИОНАМИ РЕНИЯ»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
1.3.8 – Физика конденсированного состояния

### **Актуальность темы**

Диссертационная работа Кубиси Мохамед Сайед Ибрагима посвящена комплексному исследованию свойств оптически-активных дефектов в стеклообразных матрицах  $\text{SiO}_2$ , имплантированных ионами тяжелых элементов, таких как рений, висмут, гадолиний. Стеклообразный диоксид кремния занимает важное место в современных технологиях опто(микро)-электроники и нанофотоники. Функциональные свойства указанного материала могут быть существенно улучшены, а область практических приложений значительно расширена за счет применения специальной ионно-лучевой обработки. Метод ионной имплантации является сравнительно новым и активно развивающимся направлением в области направленной модификации структуры и электронно-оптических свойств функциональных материалов. Несмотря на определенные успехи ионно-лучевых методов, остаются неясными многие особенности корпускулярного воздействия как на локальную атомную структуру и энергетические состояния, так и на весь комплекс электронно-оптических свойств получаемых материалов. Данное обстоятельство существенно ограничивает возможности создания новых материалов и устройств. В этой связи детальные исследования особенностей радиационного дефектообразования, энергетической структуры и фотоиндуцированных явлений в ионно-имплантированных матрицах с

большой запрещенной щелью представляют собой комплексную проблему физики конденсированного состояния.

Особенность диссертационной работы состоит в рассмотрении влияния многообразия факторов (тип матрицы, тип иона-имплантата, энергия имплантации и др.) на особенности образования новых разновидностей дефектов в  $\text{SiO}_2$  и формирования их спектрально-люминесцентных свойств. Используемый комплексный подход позволяет сформировать научную основу для создания новых материалов с конкретными функциональными характеристиками для создания устройств передачи и преобразования энергии, лазерные и светодиодные источники излучения, оптические датчики, сенсоры.

### **Структура и основное содержание работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 141 страницу, в том числе 52 рисунка и 15 таблиц.

Во введении показана актуальность темы диссертации; сформулированы цель и задачи работы; приведены защищаемые положения, представляющие основные научные результаты; показана их новизна и практическая значимость; отмечен личный вклад автора и апробация результатов.

В первой главе приводится известная из литературных источников информация о типах стеклообразных матриц  $\text{SiO}_2$  и методах их получения. Представлен обзор атомной структуры и спектрально-люминесцентных свойств известных разновидностей собственных дефектов в аморфном и стеклообразном диоксиде кремния.

Во второй главе приведено подробное описание типов исследуемых кварцевых стекол  $\text{SiO}_2$ , методов аттестации и исследования их спектрально-люминесцентных свойств, режимов ионно-лучевой и термической обработки, измерительных установок.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования электронных состояний и оптических свойств кислородно-дефицитных центров в исходных и имплантированных рением (30 кэВ) стеклах марки КУВИ. Показано, что в результате имплантации формируется новый тип оптически активных центров: Re-ODC(I) и Re-ODC(II). Установлено, что модификация кислородно-дефицитных центров ионами Re приводит к уменьшению энергии синглет-синглетных и увеличению энергии триплет-синглетных излучательных переходов. Приведены температурные зависимости люминесценции новых типов дефектов, рассчитаны значения термоактивационных барьеров для стадий фотовозбуждения и излучательной релаксации.

На основе кристаллической модификации правила Урбаха выполнен анализ поведения края фундаментального поглощения кварцевых стекол  $\text{SiO}_2$  при имплантации ионами рения с различными флюенсами. Установлена корреляция между ионным флюенсом и эффективной энергией «замороженных» фононов, отражающая особенности квази-динамического структурного разупорядочения в исследуемой матрице.

В четвертой главе изучено формирование оптически активных дефектов в  $\text{SiO}_2$  (марка КИ), имплантированном ионами рения с энергией 80 кэВ. Показано, что увеличение энергии ионов при имплантации приводит к формированию новых Re-related оптически активных центров. Установлено, что термический отжиг стимулирует рост концентрации Re-related центров и одновременно с этим уменьшение концентрации  $E'$  – центров в результате конверсии дефектов. На основе анализа кривых затухания люминесценции показано, что Re-related центры характеризуется более коротким временем жизни по сравнению с Re-ODC(I) и Re-ODC(II) центрами.

В пятой главе выполнен сравнительный анализ оптических свойств стекол различного типа (КУВИ, КИ, Hongan), имплантированных ионами Re, Bi и Gd. Показано, что во всех случаях при ионной имплантации происходит формирование дефектных центров M-ODC(I) и M-ODC(II), где  $M = \text{Re}, \text{Bi}$

или Gd. Установлено, что центры типа Re-related являются аналогами центров немостикового кислорода, модифицированных ионами рения. Выполнен анализ влияния типа матрицы, иона-имплантата и энергии имплантации на особенности структурного разупорядочения в исследуемых объектах.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

### **Анализ защищаемых положений**

#### Первое защищаемое положение

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. Указанное защищаемое положение не противоречит полученным в диссертационной работе результатам и вытекает из анализа поведения края фундаментального поглощения исследуемых объектов.

#### Второе защищаемое положение

Обнаружены новые типы оптически активных центров Re-ODC(I) и Re-ODC(II) в SiO<sub>2</sub>, имплантированном ионами рения. Указанные центры характеризуются изменёнными спектрально-кинетическими параметрами и энергиями внутрицентровых оптических переходов по сравнению с известными кислородно-дефицитными центрами в диоксиде кремния. Защищаемое положение сформулировано лаконично и четко. Имеет всю необходимую доказательную базу.

#### Третье защищаемое положение

Третье защищаемое положение о конверсии дефектных центров, формирующихся при ионной имплантации, полностью подтверждается экспериментальными результатами. Сформировано четко и не вызывает сомнений.

#### Четвертое защищаемое положение

Четвертое защищаемое положение сформулировано на основании комплексного анализа электронно-оптических свойств стеклообразных матриц  $\text{SiO}_2$  различного типа, имплантированных ионами тяжелых элементов. Сформулировано корректно.

#### **Новизна полученных результатов**

Все выносимые на защиту положения и результаты являются новыми в научном отношении. Наиболее значимые результаты:

Впервые в образцах стеклообразного диоксида кремния, имплантированных ионами рения, обнаружены новые модификации кислородно-дефицитных оптически активных центров: Re-ODC(I), Re-ODC(II) и Re-related. Получены данные об особенностях их энергетической структуры и спектрально-люминесцентных свойств.

Впервые изучены особенности разупорядочения атомной структуры стеклообразного  $\text{SiO}_2$  при имплантации ионами Re, определены значения параметров межзонных переходов, величины соответствующих энергетических щелей.

Впервые выполнен сравнительный анализ оптических свойств Re-модифицированных ODC-центров и аналогичных дефектов в стеклах  $\text{SiO}_2$ , имплантированных ионами Bi и Gd.

**Обоснованность и достоверность результатов** подтверждается применением целого комплекса современных методов исследования, сопоставлением результатов, полученных в разных условиях, сравнением с результатами других авторов. Полученные результаты представляются надежно проверенными и апробированными.

Автореферат и публикации автора полностью отражают полученные в диссертационной работе результаты.

#### **Практическая ценность работы**

Полученные данные об оптических свойствах стеклообразного  $\text{SiO}_2$ , 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.

### **Замечания по работе**

1. В диссертации (стр. 60 рис.3.3) представлены спектры оптического поглощения кварцевых стекол КУВИ, имплантированных ионами Re с энергией 30 кэВ с различными флюенсами. Какая величина спектрального оптического разрешения при регистрации этих спектров?
2. В результате ионной имплантации имеет место эффективное дефектообразование в областях локализации ионов (представленные в работе расчеты позволяют оценить толщину ионно-имплантированного слоя - 35 нм, стр. 59 рисунок 3.1). Вместе с тем, в спектрах оптического поглощения регистрируются переходы в центрах, локализованных во всей толщине исследуемого образца (1.5 мм). Насколько существенен вклад ионной имплантации в формирование оптически активных дефектов во всем объеме образца?
3. Термоактивационный барьер для безызлучательной релаксации возбуждения не во всех случаях определяется дискретной величиной. Для ряда разупорядоченных систем энергия активации безызлучательных переходов может иметь некое распределение по ансамблю излучающих центров. Производились ли оценки распределения энергии активации для

синглет-синглетных и синглет-триплетных переходов в исследуемых объектах?

4. В диссертации приводятся спектры фотолюминесценции, содержащие полосы, модифицированные ионами рения Re - ODC(I) Re - ODC(II).

Почему в спектрах фотолюминесценции нет полос, обусловленных только ионами Re?

### **Заключение**

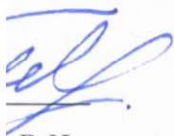
Высказанные замечания не влияют на общую положительную характеристику работы. Анализ приведённых экспериментальных данных подтверждает корректность защищаемых положений. Основные результаты были доложены на всероссийских и международных конференциях, и опубликованы в авторитетных научных журналах. Диссертационная работа актуальна, отличается новизной, содержит фундаментальные и практически значимые результаты.

Диссертационная работа Кубиси Мохамед Сайед Ибрагима является законченным научным исследованием, соответствует п.1 «теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом теле, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления», п.4 «Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменения физических свойств конденсированных веществ» и п.6 «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами» специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния по физико-математическим наукам, а также требованиям п.9 «Положения о

присуждении ученых степеней в УрФУ», предъявляемых к диссертантам на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор Кубиси Мохамед Сайед Ибрагим достоин присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Даю согласие на обработку персональных данных.

Официальный оппонент, главный научный сотрудник лаборатории оптики металлов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния, старший научный сотрудник, адрес: 620219 г. Екатеринбург, Кировский район, ул. Софьи Ковалевской, д. 18, тел: (343) 378-37-85, e-mail: visokolov@imp.uran.ru.



Соколов Виктор Иванович

Подпись Соколова В.И. заверяю

Ученый секретарь ИФМ УрО РАН

28 декабря 2021г.

