

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Кубиси Мохамеда Сайеда Ибрагима

на тему «Оптически активные дефекты в стеклообразном диоксиде кремния,
имплантированном ионами рения»

по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Актуальность избранной диссертантом темы не вызывает сомнений. Работа посвящена исследованию оптически активных дефектов в стеклообразном диоксиде кремния, имплантированном ионами рения.

В последние годы высокотехнологичные многофункциональные оптические материалы активно осваивают ультрафиолетовый диапазон спектра. К числу таких материалов относятся имплантированные и наноструктурированные матрицы на основе тонких пленок и стекол диоксида кремния, которые находят широкое применение в оптике, квантовой электронике, микроэлектронике и других областях науки и техники. Оптимизация функциональных характеристик таких материалов требует глубокого понимания их электронной энергетической структуры и физических свойств. Принципиально значимые свойства имплантированных оксидных матриц существенно отличаются от таковых для исходных материалов, характеризуются новыми люминесцентно-оптическими эффектами и для их детального изучения необходим целый комплекс современных методов исследования в области физики конденсированного состояния.

Цель диссертационной работы заключалась в комплексном исследовании закономерностей формирования модифицированных точечных дефектов и их люминесцентных свойств в ионно-имплантированных стеклах диоксида кремния $\text{SiO}_2\text{:Re}$.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ литературы по кварцевым стеклам 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 стекла, имплантированного ионами Re, методом оптической спектроскопии, установить особенности изменения структуры образцов под действием ионных потоков.

4. На основе экспериментальных данных (оптическое поглощение, фотолюминесценция (ФЛ), ЭПР, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС)) получить информацию о дефектах SiO_2 , возникших при ионно-лучевом воздействии до и после термического отжига.

5. Сравнить спектрально-люминесцентные характеристики Re-модифицированных ODC-центров и аналогичных дефектов в стеклах SiO_2 , имплантированных другими тяжелыми ионами.

Таким образом, диссертационную работу Кубиси М. С. И. следует признать актуальным научным исследованием, отвечающим запросам практики и физики конденсированного состояния.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, достигается использованием современного оборудования, воспроизводимостью результатов измерений, сопоставлением полученных результатов с известными литературными данными по аналогичной теме и апробацией результатов в авторитетных рецензируемых изданиях.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается применением современных экспериментальных методов физики конденсированного состояния, в результате которых впервые получены следующие результаты:

- впервые в стеклообразном SiO_2 , имплантированном ионами Re, определены параметры межзонных переходов, величины соответствующих энергетических щелей;
- впервые изучены особенности разупорядочения атомной структуры стеклообразного SiO_2 при имплантации ионами Re и влияние Re на формирование оптических свойств образцов;
- в образцах стеклообразного SiO_2 обнаружены модификации кислород-дефицитных оптических центров Re-ODC (I) и Re-ODC (II) и новые центры Re-related, получены данные об особенностях их энергетической структуры;
- выполнен сравнительный анализ особенностей спектрально-люминесцентных характеристик Re-модифицированных ODC-центров и аналогичных дефектов в стеклах SiO_2 , имплантированных ионами Bi и Gd.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов несомненна, т.к. они важны как в теоретическом аспекте (радиационно-оптические

свойства, разработка материалов для волноводов, линий оптической связи, тонких пленок, LED-устройств) так и в практическом (оптоэлектроника, диагностические окна для ядерных реакторов и др.).

С целью анализа и сравнения полученных данных приведены результаты имплантации ионов Bi и Gd . Изучены спектрально-люминесцентные свойства кислород-дефицитных центров и дефектов типа немостикового кислорода, модифицированных наличием ионов Re^+ , в имплантированных стеклах SiO_2 . Таким образом, рассматриваемые в работе эффекты и явления носят фундаментальный характер, имеют научную ценность и практическую значимость.

Следует рекомендовать использовать результаты и выводы диссертации в организациях, ведущих теоретические и прикладные исследования в области разработки радиационно-оптические материалов, фотоники, оптоэлектроники, например, НИЦ «Курчатовский институт», ИЭФ Уро РАН.

Оценивая содержание диссертации, ее завершенность следует отметить, что в ней установлено, что при ионно-лучевом воздействии на стекла SiO_2 происходит повреждение матрицы и возникновение собственных дефектов (E' -центры, NBOHC , ODC (I), ODC (II)), а также новых кислород-дефицитных центров, модифицированных ионами Re : моновакансия Re-ODC (I), дивакансия Re-ODC (II), в локальном окружении которых находятся внедряемые ионы, и предположительно Re -модифицированный центр немостикового кислорода (Re-NBOHC). Модификация структуры ближнего окружения дефектов приводит к снижению энергии синглет-синглетных внутрицентровых электронных переходов и возрастанию энергии синглет-триплетных переходов. Электронная структура Re-NBOHC центра зависит от энергии внедряемых ионов. Обнаружено также, что при имплантации ионов Bi и Gd в матрицы SiO_2 различного типа создаются аналогичные дефекты. При этом на спектральные характеристики влияют размер и масса ионов.

Структура и объем диссертации. Диссертация написана на английском языке, состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 141 страницу печатного текста, включая 15 таблиц, 52 рисунка. Список литературы содержит 193 библиографических наименований. Стиль изложения диссертации – формально-логический. Работа оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к диссертациям.

Во введении обсуждается актуальность исследований, формулируются цели и задачи работы, определяются объекты и методы исследований. Обосновываются научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены

защищаемые научные положения. Описывается структура и содержание работы.

В первой главе представлен литературный обзор области исследований, особенно прототипов исследуемых в работе точечных дефектов SiO_2 : E' -центры, ODC(I) и ODC(II) , пероксидный радикал и др. Приведены сведения об имплантируемом элементе Re. Рассмотрены физические основы используемых экспериментальных методов.

Вторая глава посвящена описанию технологии синтеза образцов, измерительных установок и экспериментальных методик. Обсуждаются основы метода ионной имплантации.

Содержание **третьей главы** связано с исследованием оптических и люминесцентных свойств кислород-дефицитных центров в стекле КУВИ, имплантированном ионами Re с энергией 30 кэВ. Приведены результаты РФЭС-аттестации стекол. Предложены диаграммы переходов для обнаруженных точечных дефектов. Температурная эволюция экспоненциальных спектров поглощения проанализирована на основе формализма правила Урбаха.

В четвертой главе проведены исследования свойств кислород-дефицитных центров в стекле КИ, имплантированном ионами Re с энергией 80 кэВ. Приведены результаты измерений, аналогичных главе 3. Также записаны спектры ЭПР парамагнитных Re-центров, кинетика затухания ФЛ.

В пятой главе сравниваются свойства кварцевых стекол, облученных тяжелыми ионами разного типа Re, Bi, Gd.

В диссертации получены новые результаты:

- показано, что вместе с известными дефектами кварцевых стекол при ионной имплантации возникают новые кислород-дефицитные центры, модифицированные ионами Re (Re-ODC(I) и Re-ODC(II)), в локальном окружении которых располагаются внедряемые ионы. Вследствие модификации меньше смещаются уровни триплетных состояний, а больше – синглетных;
- отдельные дефекты предположительно представляет собой Re-модифицированный центр немостикового кислорода (Re-NBOHC). При этом при имплантации ионов с энергией 30 и 80 кэВ полосы люминесценции имеют различные спектральные характеристики;
- воздействие ионов Bi и Gd носит аналогичный характер: создаются дефекты типа M-ODC(I) и M-ODC(II) с измененной энергетической структурой, где M – ионы-имплантаты;
- установлены закономерности разупорядочения атомной структуры при имплантации

кварцевых стекол различными флюенсами тяжелых ионов и продемонстрирована высокая степень разупорядочения и малая радиационная стойкость стекол Hongan, в то время как наибольшая стойкость показана для стекла КУВИ (тип IV).

Вопросы, замечания и недостатки в содержании и оформлении диссертации.

1. Известно, что при воздействии α , β , γ , рентгеновского, лазерного излучения, а также ионного пучка на группы SiO_4 в стеклах происходит разрыв связи Si—O и высвобождается электрон. Благодаря этому происходит радиационное восстановление ионов переходных металлов (Мальчукова Е.В. Диссертация д.ф.-м.н., 2015; Jiajia Zhou, Guojun Zheng et al. *Coordination Chem. Rev.* 448 (2021) 214178). Рений имеет валентные состояния от -1 до +7. Происходит ли изменение зарядового состояния некоторого количества ионов Re^+ в процессе имплантации? Как такое изменение заряда могло бы повлиять на формирование новых оптических центров?

2. В названии п. 3.1 говорится об аттестации (характеризации) образцов при помощи программы SRIM, что не совсем корректно, так как SRIM дает лишь предварительную модельную оценку распределения ионов после имплантации, не учитывая взаимодействий между ионами.

3. Для более убедительного доказательства предлагаемых моделей новых кислород-дефицитных центров желательно подключить в методы исследования Раман-спектроскопию.

4. Английский текст диссертации содержит ряд грамматических ошибок и опечаток: отсутствие заглавных букв в начале предложений и точек в конце. Подписи к рисункам 1.3, 1.12, 4.3, 4.4 не отформатированы единообразно. В автореферате имеются повторы текста (с. 12, 13).

Однако эти замечания не могут изменить общего высокого впечатления от диссертационной работы, не снижают ее фундаментальности и научной значимости.

Таким образом, диссертация *Кубиси М.С.И.* представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему, соответствует мировым стандартам, содержит новые оригинальные результаты, имеющие высокую теоретическую и практическую значимость. Исследования, выполненные автором диссертации, вносят существенный вклад в решение важной научной задачи физики конденсированного состояния по исследованию матриц диоксида кремния, имплантированных тяжелыми ионами. Основные результаты работы доложены и обсуждены на российских и международных конференциях, они достаточно полно опубликованы в 9-и печатных работах в высокорейтинговых рецензируемых научных

журналах, входящих в перечни ВАК, базы данных Web of Science и Scopus и Аттестационного совета УрФУ. Научная тема и содержание работы полностью соответствуют паспорту специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния. Автореферат и опубликованные работы правильно и полно отражают содержание диссертации. Достоверность и новизна полученных результатов хорошо обоснованы, личный вклад автора ясно определен.

Считаю, что диссертационная работа соответствует требованиям п.п. 9-11 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, *Кубиси Мохамед Сайед Ибрагим*, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,

доктор химических наук, профессор,

главный научный сотрудник лаборатории оксидных систем

ФГБУН Институт химии твердого тела

Уральского отделения Российской академии наук

620990, Екатеринбург, ГСП, ул. Первомайская, 91

тел. +7(343) 374-5219

адрес электронной почты: zuev@ihim.uran.ru



/ Зув Михаил Георгиевич /

Дата *10.01.2022 г.*

Подпись официального оппонента заверяю:

Ученый секретарь ИХТТ УрО РАН

К.Х.Н.



Е.А. Богданова

