

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Кубиси Мохамеда 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.**

Главным материалом, который используется в оптико-электронных устройствах, остается кремний. Огромные запасы, относительная дешевизна, а также его физико-химические свойства и отличная технологичность стимулировали революцию в создании кремниевых «продуктов» и внедрение их практически во все области индустрии и повседневной жизни. Так, например, самым используемым веществом является диоксид кремния в кристаллическом и стеклообразном состояниях.

Расширение области применения данного материала может быть осуществлено за счет создания новых свойств или влияния на определенные характеристики. Такая оптимизация может быть получена с помощью ионной имплантации примесей, которая приводит к модификации структуры и формированию дефектов. В результате ионной обработки образуется функциональный материал с новыми характеристиками, которые необходимо изучать.

В настоящей работе легирующей примесью является рений, который имеет широкий диапазон изменения валентности. При его имплантации в аморфный диоксид кремния создаются определенные дефекты, взаимодействующие с матрицей и имеющие свойства, некоторые из которых ранее не изучались. Таким образом, *целью диссертационной работы* Кубиси Мохамеда Сайед Ибрагима является комплексное изучение оптических свойств точечных дефектов в стеклообразном диоксиде кремния, имплантированном ионами рения, и их спектрально-люминесцентных параметров, изменяющихся при пост-имплантационных воздействиях. Работа является актуальной и важной с научной и практической точек зрения.

### **Анализ содержания диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем диссертации составляет 141 страницу, включая 52 рисунка, 15 таблиц и библиографический список из 193 наименований.

*Во введении* сформулированы актуальность и степень разработанности темы, цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, кратко

перечислены методы исследования, выносимые на защиту положения, степень достоверности и апробация работы, а также личный вклад автора.

*В первой главе* рассмотрена структура диоксида кремния, приведены основные свойства, методы его производства и область применения, указаны типы кварцевых стекол, подробно описаны точечные дефекты в них и основные методы исследования. Здесь также приведены характеристики рения и область его применения, рассмотрены абсорбционные и люминесцентные характеристики. В результате проведенного обзора сделаны выводы о влиянии точечных дефектов, количество которых определяется методом производства стекла, на электронно-оптические свойства данного материала.

*Вторая глава* посвящена описанию основ, особенностей и преимуществ ионной имплантации. Здесь же приведены объекты и аппаратура для изучения люминесцентных и абсорбционных свойств в широком диапазоне длин волн и исследования парамагнитных центров методом электронного парамагнитного резонанса.

*В третьей главе* приведены данные по исследованию оптических свойств кислородно-дефицитных центров в стекле марки КУВИ, имплантированном ионами рения с энергией 30 кэВ. Здесь обсуждаются спектры оптического поглощения для образцов в зависимости от флюенса облучения, проведена идентификация центров. Зарегистрированы спектры возбуждения и соответствующие спектры фотолюминесценции. Здесь же продемонстрированы спектры фотолюминесценции собственных дефектов, моновакансий (Re-ODC (I)-T<sub>1</sub>, Re-ODC (I)-S<sub>1</sub>) и дивакансий (Re-ODC (II)-T<sub>1</sub>, Re-ODC (II)-S<sub>1</sub>) кислорода, в локальном окружении которых находятся ионы рения, возбуждаемые энергиями 6,8 и 7,5 эВ соответственно и измеренные при разной температуре. Построены температурные зависимости и приведены уравнения, описывающие поведение фотолюминесценции этих дефектов с учетом диаграммы электронных состояний. Анализируется поведение края фундаментального поглощения образцов, которое подчиняется правилу Урбаха с параметрами, отражающими степень структурного беспорядка.

*Четвертая глава* посвящена исследованию оптических свойств кислородно-дефицитных центров в стекле марки КИ, имплантированном ионами рения с энергией 80 кэВ. В главе приводятся данные по образованию центров E' и Re - ODC, а также данные по обнаруженному новому центру, который имеет отличную от Re-ODC энергетическую структуру. С помощью фотолюминесценции определена эффективная передача энергии от Re-ODC к Re – связанным центрам, люминесценция которых может возбуждаться через полосу поглощения Re-ODC. Обнаружено влияние термического отжига на имплантированные образцы, проявляющееся в конверсии парамагнитных дефектов (E' -

центры), что, в свою очередь, приводит к увеличению концентрации диамагнитных центров (Re-ODC и Re-связанные центры). Проведено исследование кинетики затухания фотолюминесценции диамагнитных центров до и после термического отжига.

В *пятой главе* приводится результат сравнения дефектообразования в матрицах SiO<sub>2</sub> при имплантации ионами Re, Bi и Gd при энергии 30 кэВ и ионами Re при энергии 80 кэВ. Показано, что распределения имплантированных ионов зависят от их энергии, ионного радиуса и их массы. Ионная имплантация увеличивает степень структурного беспорядка и уменьшает запрещенную зону облученной матрицы. Обсуждаются все обнаруженные центры, их параметры и приводится идентификация полос с соответствующими выводами.

В *заключении* сформулированы основные результаты работы, и перспективы дальнейшей разработки темы.

**Анализ защищаемых положений.** В работе представлены к защите четыре положения, каждое из которых вытекает в результате общего анализа всей диссертационной работы. Все положения доказаны в достаточной степени. Однако есть **замечание** по формулировке четвертого положения, где указано про тип внедряемых ионов. Соискатель в диссертации рассмотрел три типа имплантированных ионов – Re, Gd и Bi, а в формулировке защищаемого положения эти три иона сведены в общий тип – переходные, редкоземельные и типичные, что приводит к автоматическому расширению полученных результатов на всех представителей данных типов элементов. Данная формулировка является некорректной, а в положении надо было просто указать конкретные имплантированные ионы, а в диссертации привести обоснование по выбору именно этих ионов.

На протяжении всей диссертации автор использует известные научные методы обоснования полученных результатов. Достоверность полученных экспериментальных данных, научных положений и выводов обеспечиваются корректностью постановки цели работы, решаемых задач, их физической обоснованностью, проведением экспериментальных исследований с применением современных методов на аттестованной аппаратуре. Кроме того достоверность обеспечивается непротиворечивостью полученных результатов существующим представлениям по исследованию люминесцентно-оптических свойств данных материалов. Автореферат соответствует тексту диссертации.

#### **Новизна полученных результатов.**

Получен комплекс новых экспериментальных данных по дефектообразованию в диоксиде кремния, имплантированном ионами рения, гадолиния и висмута.

#### **Практическая ценность работы.**

Полученные в работе экспериментальные данные показали перспективы возможного дальнейшего развития по созданию новых функциональных материалов на основе некристаллического диоксида кремния и его аналогов с заданными характеристиками, полученных с помощью метода ионной имплантации.

#### **Замечания по работе.**

1. Данное замечание касается структуры диссертации. Во-первых, не приводится полный перечень аналогов и исследуемых образцов в одном месте. Это затрудняет чтение, так как приходится каждый раз листать диссертацию, чтобы уточнить тип стекла. Во-вторых, у образцов, используемых для сравнительного анализа, отсутствует их аттестация. В-третьих, в выводах ко второй главе приводятся результаты, которые рассматриваются в начале третьей и четвертой глав.
2. На рисунке 3.1 приводится распределение по глубине проникновения ионов Re в стекле марки КУВИ при энергии имплантации 30 кэВ. Автор говорит, что максимум распределения соответствует глубине 22 нм, при этом результат аппроксимации с параметрами распределения не приводит. Ориентируясь на рисунок, эта величина не превышает 18-19 нм, что можно считать сдвигом при совсем небольшой ширине распределения. Этот результат используется и в главе 5 при анализе глубин проникновения Gd и Bi, где автор делает соответствующие выводы. О чем же может говорить сдвиг максимальной глубины в марке одного и того же типа стекла при одной и той же энергии тяжелых ионов?
3. В диссертации не приводятся данные по погрешностям измерений энергий, не приводится точность проведения аппроксимаций. Можно встретить одну и ту же полосу, указанную в тексте, таблице, на рисунке, в схеме с разными значениями энергий.
4. Замечания по оформлению диссертационной работы. В диссертации приведен совершенно нечитабельный рисунок 2.3, встречаются также опечатки и описки. В главе 5 не приводится ни одного спектра, а результаты только описываются словами, по сравнению с 3 и 4 главами, где приводится весь демонстрационный материал.


**Заключение.** Высказанные замечания не влияют на общую положительную характеристику работы. Анализ приведенных экспериментальных данных подтверждает корректность защищаемых положений. Основные результаты доложены на 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 специальности 1.3.8 – Физика конденсированного

состояния по физико-математическим наукам, а также требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ", предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Кубиси Мохамед Сайед Ибрагима заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Даю согласие на обработку персональных данных.

Официальный оппонент, старший научный сотрудник лаборатории квантовой электроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.07-Физика конденсированного состояния, адрес: 620016 г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106, телефон +7(343)2678779, электронная почта: [rasuleva@ier.uran.ru](mailto:rasuleva@ier.uran.ru)

 Спирина Альфия Виликовна

Подпись Спириной А.В. заверяю

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, кандидат физико-математических наук

адрес: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106, сайт: [www.ier.uran.ru](http://www.ier.uran.ru)

 Кокорина Елена Евгеньевна

15 декабря 2021 г.