

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК 548.4:535.33/37

САЛАМ БАДЕЙ САЛЕМ

ДЕФЕКТНАЯ СТРУКТУРА И ФИЗИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА МИНЕРАЛЬНОГО КВАРЦА

01.04.07 — Физика твердого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ДОНЕЦК — 1993 г.

Робота виконана на кафедрі фізики твердого тіла і фізичного матеріалознавства Донецького державного університету.

Наукові керівники: доктор фізико-математических наук, професор Бажин А.І.
доктор хімічних наук, кандидат фізико-математических наук, професор Сунцов Н.В.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математических наук, професор Стыров В.В.
кандидат фізико-математических наук, доцент Малиненко Е.М.

Ведуча організація: Донецький фізико-технічний інститут АН України

Захита состоится "19" мае 1993г. в 15⁰⁰ часов на заседании специализированного совета К 068.06.01 Донецького державного університету по адресу:

340055, Донецьк-55, ул.Університетська, 24, ДонГУ, головний корпус

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ДонГУ.

Автореферат разослан "9" апреля 1993г.

Ученый секретарь специализированного совета

кандидат физико-математических наук

25 А.Е.Зюбанов

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00803161 (J)

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

Актуальность темы. Одним из основных направлений физики твердого тела в настоящее время является исследование влияния дефектов кристаллической решетки на физические свойства неорганических материалов. Точечные дефекты влияют на многие свойства неорганических материалов (тепловые, электрические, магнитные, оптические, механические). Этому вопросу посвящены многочисленные статьи и монографии, но наши представления о природе дефектных состояний твердого тела находятся ещё в начале своего развития. Из-за отсутствия последовательной микроскопической теории сложных дефектных кристаллов, трактовка многих физических свойств требует комплексного подхода с позиций термодинамики и физики твердого тела. В настоящее время только комплексный подход к исследованию неорганических материалов может обеспечить дальнейшие успехи в развитии теории, раскрывающей возможности целенаправленного изменения физических свойств практически важных неорганических материалов. Значительное внимание в настоящее время уделяется исследованиям силикатных систем всех модификаций. Основным структурным элементом силикатов является кислородно-кремниевый тетраэдр. Одним из важнейших соединений кремния с кислородом является его двуокись SiO_2 , которая может существовать как в кристаллическом, так и в аморфном состояниях. Установлено, что кремниво-кислородный тетраэдр сохраняется при переходе кристаллического SiO_2 в стеклообразное состояние, причем относительно атома кремния сохраняется ближний порядок. Поэтому исследование такого "ключевого" соединения, как $\alpha\text{-SiO}_2$, в настоящее время является актуальной, оно имеет теоретический и практический интерес.

Целью работы является исследование влияния собственных точечных дефектов на физические свойства α -SiO₂. Полученные теоретические зависимости концентраций ионных и электронных дефектов в легированном α -SiO₂ использованы для объяснения физических свойств минеральных кварцев Кыштымского месторождения.

Автор работы защищает:

- Вывод о том, что основными собственными точечными дефектами минеральных кварцев Кыштымского месторождения являются: вакансии кислорода V_O и междоузельный кислород $(O_2)_i$ и O_i .

- Теоретические расчеты концентрации точечных дефектов в чистом и легированном α -SiO₂.

- Результаты исследований ионного и электронного переноса в α -SiO₂.

- Результаты исследований сптического поглощения, фото-, ионо-, термолюминесценции минеральных кварцев и механизм возникновения обнаруженных полос.

- Теоретическую зависимость интенсивности внутрицентрального свечения доминирующей полосы при 460 нм.

Научная новизна.

Комплексные исследования минеральных кварцев показали, что их оптические свойства, главным образом, определяются собственными точечными дефектами (вакансии кислорода, междоузельный кислород $(O_2)_i$ и O_i и основными примесями Al и Ti.

Впервые показано, что электропроводность α -SiO₂ осуществляется в результате прыжков поляронов малого радиуса по катионам кремния.

В рамках теории разупорядоченности кристаллов сделаны теоретические расчеты дефектной структуры чистого и легированного α -SiO₂.

Доминирующая полоса при фото- и ионolumинесценции кварцев при 460 нм связана с переходом электрона с нейтральной вакансии кислорода на акцепторный уровень, возникающий вследствие растворения алюминия по типу замещения атома кремния.

Установлено, что полосы фотolumинесценции при 2,4 и 3,2эВ связываются с собственными междоузельными дефектами $(O_2)_i$ и O_i .

Показано, что интенсивность внутрицентрового свечения доминирующей полосы при 460нм может быть описана как функция концентрации вакансий кислорода и температуры, которая зависит от скорости безизлучательного процесса $V_0^+ + e^- \rightarrow V_0^x$.

Установлено, что собственные дефекты при термolumинесценции получают электроны проводимости из одного типа ловушек, что превращает собственные дефекты в центры люминесценции.

Научная и практическая ценность.

Так как исследования проведены на промышленных образцах, то их результаты имеют не только теоретический, но и практический интерес.

Комплексные исследования физических свойств кварцев позволили получить цельную картину влияния собственных дефектов в кристаллической решётке на их оптические свойства и снять ряд противоречий в трактовке литературных данных.

Разработанные модели дефектных структур могут быть использованы для прогнозирования изменения оптических свойств кварцев при их легировании различными примесями и при интерпретации экспериментальных результатов исследований физических свойств кварцев других месторождений.

Диоксид кремния является основным объектом многих исследований в области физики неупорядоченных структур потому, что

он может существовать как в кристаллическом, так и в стеклообразном состояниях, причем относительно атома кремния сохраняется ближний порядок. Поэтому новые сведения о кварцах являются полезными не только при изучении влияния дефектов структуры на свойства кристаллических полупроводниковых соединений, но и при исследовании стекол, стеклообразующих веществ (силикатов).

Достоверность исследований обеспечена благодаря применению различных методик и тщательного сравнения полученных результатов между собой. Образцы для исследований были приготовлены из материалов минеральных кварцев Кыштымского месторождения, которые подвергались масс-спектроскопическому, спектральному, химическому, рентгеновскому структурному и фазовому анализам. При обсуждении экспериментальных результатов широко привлекались и тщательно сравнивались литературные данные, полученные различными методами исследования. Применялась современная аппаратура и методики, проводилась статическая обработка экспериментальных результатов, учитывалась погрешность измерений. При интерпретации экспериментальных результатов использовалась модель соединения $\alpha\text{-SiO}_2$, построенная на основе фундаментального условия электронейтральности кристалла в целом. Расчеты дефектной структуры кристаллов проводились с помощью проверенной в практике теории разупорядоченности кристаллов. При интерпретации экспериментальных результатов электронного переноса наряду с теорией разупорядоченности кристаллов и зонной теорией использовалась широко признанная в настоящее время теория полюнов малого радиуса.

Такая система изучения свойств $\alpha\text{-SiO}_2$ подтвердила корректность теоретических допущений и ограничений, принятых при

интерпретации экспериментальных результатов.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертации были представлены и обсуждались: на международном совещании-семинаре "Диагностика поверхности ионными пучками" (18-21 мая 1992г., г.Запорожье, 2 доклада); на научной конференции профессорско-преподавательского состава Донецкого госуниверситета. (апрель, 1993г., г.Донецк, 3 доклада); по материалам работы опубликовано 5 тезисов докладов и 1 статья находится в печати.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 186 страницах машинописного текста, включая 43 рисунка, 7 таблиц и список литературы из 219 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована проблематика и цель настоящего исследования, дана общая характеристика работы, показана её актуальность.

В первой главе дается обзор литературы по исследованию влияния дефектов структуры на физические свойства диоксида кремния. На основании приведенного обзора формулируются конкретные задачи настоящей работы.

Во второй главе описаны методики приготовления и аттестации образцов, методики изучения ионного и электронного переноса, измерения спектров оптического поглощения, фото-, ионо- и термомлюминесценции кварцев.

В работе использовались образцы минеральных кварцев Кыштымского месторождения. Были проведены масс-спектроскопические измерения состава образцов по обычной методике, применяемой для

анализа состава поверхности твердых тел во вторичной ионной масс-спектрографии. Кроме этого образцы подвергались рентгеновскому структурному и фазовому анализам.

Перед исследованиями оптических свойств образцы Кыштымского месторождения размалывались в агатовой ступке (порошок с частицами 0,1 - 0,4 мм). По данным химического анализа^{x)} основной примесью в наших образцах, которые согласуются с результатами масс-спектрографических исследований, является алюминий ($10^{-3} + 10^{-2}$ мас. %). Количество титана, меди невелико (менее 10^{-4} %), а концентрация лития, калия, натрия, магния во всех образцах практически постоянна и мала (менее 10^{-4} %). Концентрация кальция, марганца, хрома, никеля, свинца, олова, молибдена, кобальта и вольфрама незначительна (менее $10^{-5} + 10^{-6}$ %). Исключения составляют образцы 7 и 5 (см. табл.). В них повышенная концентрация титана ($3 \cdot 10^{-2}$; $6 \cdot 10^{-4}$ %), меди ($8 \cdot 10^{-5}$; $5 \cdot 10^{-5}$ %), а у образца 6 минимальное содержание алюминия (10^{-3} %), но содержание титана несколько значительнее, чем в других белых образцах, что и придает ему желтоватый оттенок.

Для установления механизма проникновения кислорода в α - SiO_2 использованы литературные данные о коэффициентах диффузии кислорода в кварце, а также результаты наших исследований кинетики роста слоя SiO_2 на Si в кислородосодержащей атмосфере.

Высокотемпературное измерение электропроводности и термо-э.д.с. проводились одновременно на одном и том же образце. Погрешность при определении коэффициента термо-э.д.с. ($\alpha = \Delta E / \Delta T$) в основном определялась погрешностью в измерении ΔT . Разброс

^{x)} Анализ выполнен методом тепловой десорбции в институте ГОСНИИКС (г. С.-Петербург).

от средних значений составлял 7-8%. Сопротивление образцов измерялось четырёхзондовым методом. Разброс от средних значений электропроводности был $\pm 5\%$.

Исследования спектров отражения и поглощения проводилось с помощью спектрофотометра СФ-4 и специально изготовленной приставки к нему.

При исследовании фотолюминесценции использовалась ксеноновая лампа ДКСЭЛ-1000-5, монохроматор (СФ-4), спектрофотометр (СФ-4) и фотоэлектронный умножитель ФЭУ-140.

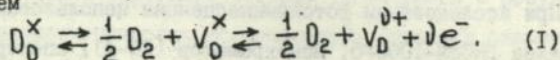
Во время исследований ионolumинесценции и ионно-фотонной эмиссии ионы H^+ и Ar^+ , получаемые в газоразрядном ионном источнике, с помощью ускорителя вытягивались из источника ионов. Энергия бомбардирующих ионов была невелика (5 кэВ, 5 мкА см⁻²) для того, чтобы за время снятия спектра не происходило значительных разрушений кристаллической решетки $\alpha-SiO_2$.

Регистрация термолюминесценции образцов осуществлялась с помощью ФЭУ "Фотон-140"; запись кривой термовысвечивания производилась двухкоординатным самописцем ПДС-021. Система нагрева позволяла регулировать скорость нагрева в пределах 0,2 - 19 градусов в секунду.

Третья глава посвящена исследованию ионного и электронного переноса в $\alpha-SiO_2-x$. Для оценки величины ионного переноса использовались полученные нами значения констант K_p параболического временного закона роста слоя SiO_2 на Si в кислородо-содержащей газовой фазе и литературные данные по измерению коэффициента диффузии кислорода D_0 в $\alpha-SiO_2$.

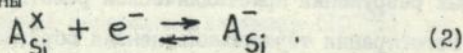
Электропроводность n -типа в чистом $\alpha-SiO_2$, очевидно, может возникать благодаря появлению донорных центров (между -

узельных катионов Si_i или вакансий кислорода V_O). Анализ результатов наших исследований и литературных данных показал, что концентрацией междоузельных катионов кремния и вакансий кремния можно пренебречь при расчетах дефектной структуры с использованием уравнения электронейтральности кристалла. Образование вакансий кислорода и их последующая ионизация описывается уравнением

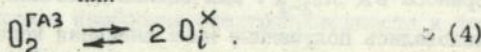
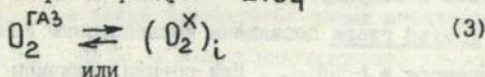


Здесь O_0^x - кислород на месте кислорода, имеющий нейтральный эффективный заряд; V_O^x , V_O^{j+} - нейтральная и ионизированная вакансии кислорода; e^- - электрон; j - степень ионизации вакансий кислорода ($0 \leq j \leq 2$).

Основная примесь Al_{Si} (алюминий на месте кремния) создает в кристалле акцепторные уровни ($Al_{Si}^{3+} \equiv A_{Si}^x$), которые могут захватывать электроны



Кислород может растворяться в α - SiO_2 в виде молекул или атомов вследствие того, что в направлении оси симметрии высшего порядка (тригональной) он имеет сквозные каналы, размеры которых превышают размеры тетраэдров SiO_4 .



Возникающие акцепторные центры могут захватывать электроны, превращаясь в $(O_2)_i^-$ и O_i^- . Используя уравнение электронейтральности кристалла, можно получить зависимости концентраций вакансий кислорода для чистого SiO_2

$$[V_O^{j+}]_0 = j^{-\frac{j}{j+1}} \cdot C_2^{\frac{1}{j+1}} \cdot P_{O_2}^{-\frac{1}{2(j+1)}} \quad (5)$$

и легированного акцепторными примесями $(O_2)_i$, O_i и Al_{Si}

$$\left(\frac{[V_0^{j+}]}{[V_0^{j+}]_0} \right)^{\frac{j+1}{j}} = (1 + C_{25}^{-1} [(O_2)_i^x] + C_{26}^{-1} [O_i^x] + C_{14}^{-1} [A_{Si}^x]). \quad (6)$$

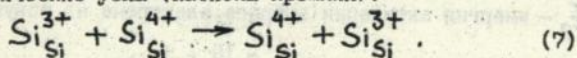
Здесь C_2 - константа реакции образования V_0^{j+} , C_{14} , C_{25} и C_{26} - константы ионизации акцепторных примесей, соответственно.

Экспериментальные результаты показывают: $K_p \sim P_{O_2}^1$ и $D_0 \sim P_{O_2}^1$, что свидетельствует о преимущественной диффузии кислорода по междоузлиям в виде $(O_2)_i$ (см. формулу 3).

Исследование электропроводности кварца в области температур 293 - 846 К показало, что график зависимости логарифма электропроводности σ от обратной температуры представляет из себя прямую линию, при этом величина $\gamma \approx const$. По результатам измерений σ и термо-э.д.с. оценена концентрация носителей тока (10^{22} м^{-3}), их подвижность ($3,4 \cdot 10^{-15}$ - $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$), энергия активации проводимости (1,2 эВ) и степень нестехиометрии нашего образца ($\gamma \approx 10^{-7}$).

С помощью теории поляронов показано, что наиболее вероятным механизмом проводимости кварца можно считать механизм перескока электронов, локализованных на ионах кремния Si_{Si}^{3+} . Электроны проводимости появляются благодаря ионизации кислородных вакансий, играющих роль собственной донорной примеси ($V_0^x \rightarrow V_0^+ + e^-$). Затем они локализуются на катионах кремния ($e^- + Si_{Si}^{4+} \rightarrow Si_{Si}^{3+}$).

Вследствие электрон-фононного взаимодействия и действия электрического поля, электроны мигрируют на ближайшие однотипные кристаллографические узлы (катионы кремния):



Энергия активации такого процесса (рис.1) составляет 0,6 эВ. Из графика $\lg G - 1/T$ установлено, что донорная примесь находится ниже дна валентной зоны на 1,2 эВ.

В четвертой главе рассматриваются дефектная структура и оптические свойства минеральных кварцев (см. табл.).

При сравнении экспериментальных результатов исследований оптических свойств $\alpha\text{-SiO}_2$ было оценено возможное изменение ширины запрещенной зоны от температуры, нестехиометрии, концентрации примесей. Анализ наших результатов исследований оптического поглощения (ОП), фотолюминесценции (ФЛ), ионолюминесценции (ИЛ) и термолюминесценции (ТЛ) проводится с привлечением литературных данных. Показано, что теоретические зависимости, приведенные в главе 3, могут быть использованы для объяснения оптических свойств минеральных кварцев, они позволяют прогнозировать изменение интенсивности полос ФЛ при легировании кристалла алюминием, титаном и кислородом (O_2)_i и O_i .

Анализ кинетики затухания основной полосы ФЛ при 460 нм (293 К) позволил установить, что вакансии кислорода в $\alpha\text{-SiO}_2$ находятся преимущественно в однократно ионизированном состоянии.

Получена формула интенсивности основной полосы $\alpha\text{-SiO}_2$ (460нм), при термовысвечивании:

$$I = k \omega_0 e^{-E_3/kT} \cdot [V_0^X]_0 \cdot \exp \left[-\frac{\omega_0}{\tau} \int_{T_0}^T e^{-E_3/kT} dT \right],$$

где $[V_0^X]_0$ - концентрация вакансий кислорода V_0^X в начальный момент времени; k - коэффициент пропорциональности; ω - вероятность освобождения электрона из ловушек ($\omega = \omega_0 \exp(-E_3/kT)$); E_3 - энергия активации выброса электрона из ловушки Si_{Si}^{3+} ;

\dot{T} - скорость нагревания образца.

$E_3 = 1,2$ эВ по данным электропроводности и термолюминесценции.

На рис. 2, 4 и 5 приведены типичные спектры ФЛ, ИЛ и ТЛ, а на рис. 3 - положения уровней различных центров в запрещенной зоне α - SiO_2 .

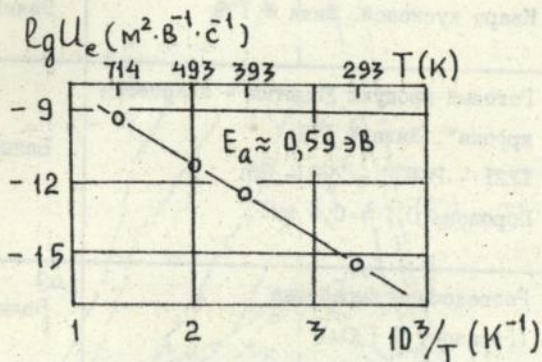


Рис. 1. Температурная зависимость подвижности носителей тока в α - SiO_2 .

Таблица

Номер образца	Сведения об образце	Цвет образца
1	Кварц кусковой. Жила № 179	Белый
2	Готовый продукт "Кыштым - кварцевая крупка". Жила № 179. ТУ21 - РСФСР - 790 - 86. Порошок (0,1 + 0,4 мм)	Белый
3	Разведочная выработка (Горизонт № 136м)	Белый
4	Кварц кусковой. Гора Хрустальная.	Белый
5	Кварц кусковой. Жила № 170.	Желтоватый
6	Кварц кусковой. Жила № 56.	Желтоватый
7	Кварц кусковой. Жила № 56.	Красноватый

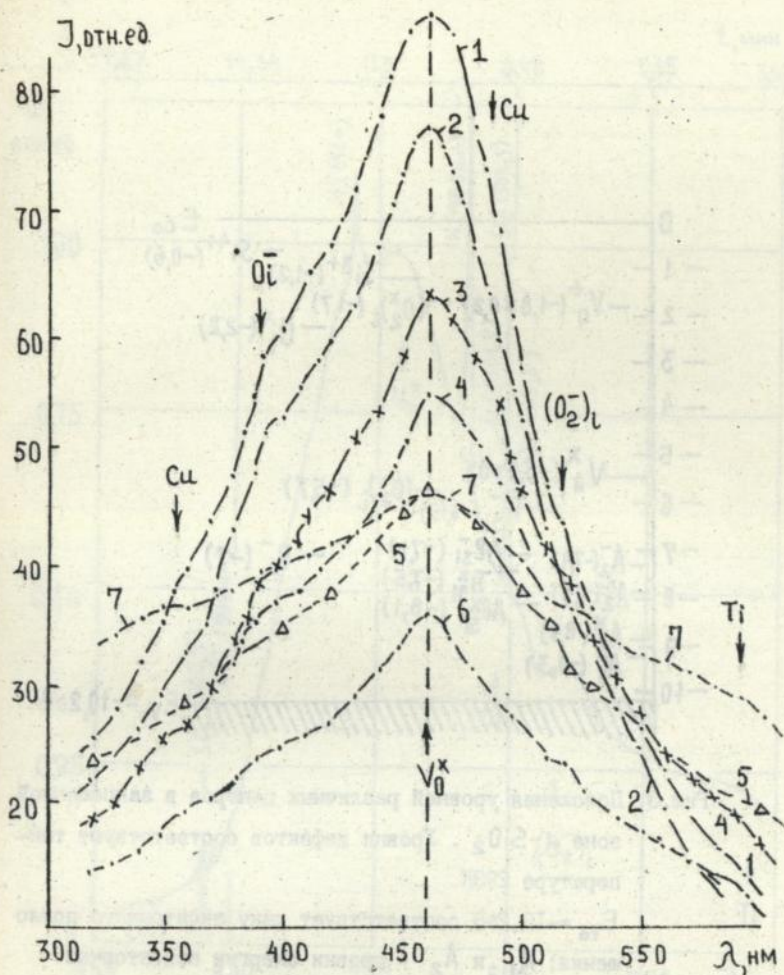


Рис.2. Сводный график спектров ФЛ образцов α -SiO₂
 (см. табл. $\lambda_0 = 300\text{nm}$, температура 293К).

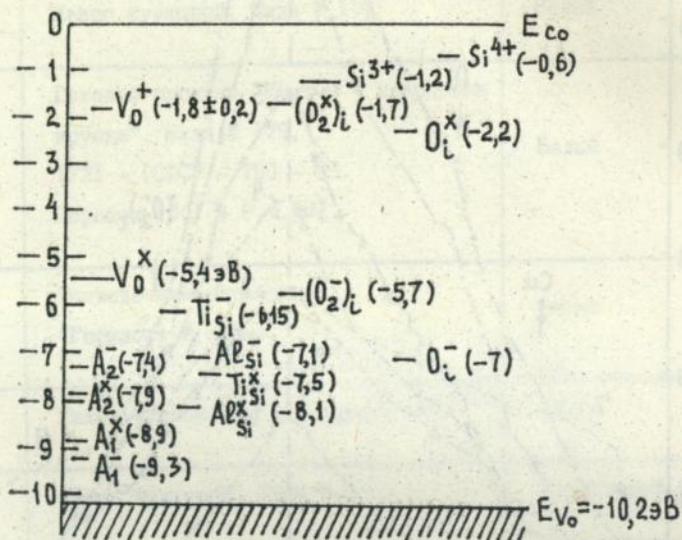


Рис. 3. Положения уровней различных центров в запрещенной зоне α - SiO_2 . Уровни дефектов соответствуют температуре 293К.

$E_{V_0} = -10,2\text{эВ}$ соответствует пику экситонного поглощения; A_1 и A_2 - уровни энергии акцепторной примеси Cu^+ , создающие центры синей и зеленой люминесценции соответственно.

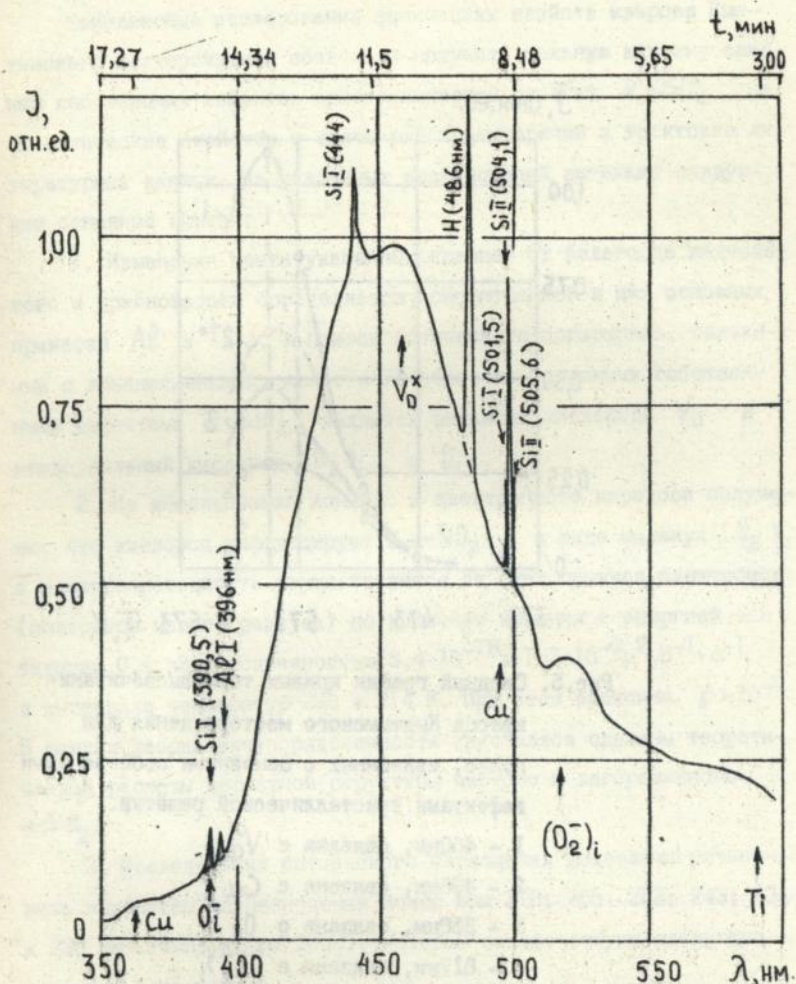


Рис. 4. Типичный спектр ИЛ и ИФЭ образца I. (Бомбардировка H^+ , 7кэВ, $6\text{мкА}/\text{см}^2$, $\alpha = 35^\circ$, начало облучения при 645нм, конец облучения при 300нм. Общее время обл. $t_{\text{об}} = t + 20\text{мин.}$)

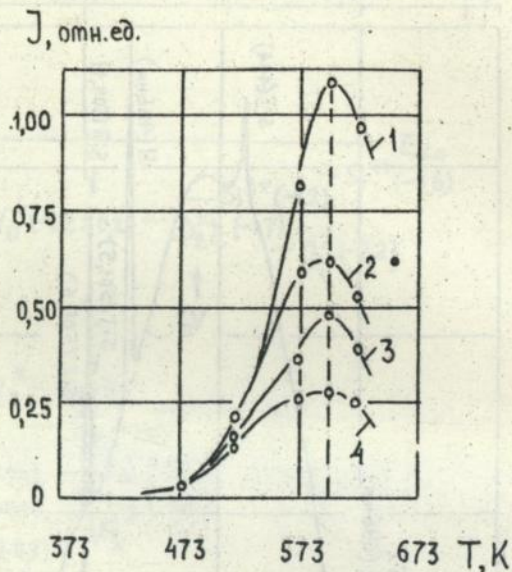


Рис.5. Сводный график кривых термовысвечивания кварца Кыштымского месторождения для полос, связанных с основными собственными дефектами кристаллической решётки.

- 1 - 460нм, связана с V_0^x ;
- 2 - 496нм, связана с $Сu$;
- 3 - 388нм, связана с O_i^- ;
- 4 - 517нм, связана с $(O_2^-)_i$.

В заключение приводятся основные выводы.

Комплексные исследования физических свойств кварцев Кыштымского месторождения позволили получить цельную картину влияния собственных дефектов кристаллической решётки $\alpha\text{-SiO}_2$ на их оптические свойства и снять ряд противоречий в трактовке литературных данных. Из указанных исследований вытекают следующие основные выводы:

1. Изменение цвета указанных кварцев от белого до желтоватого и красноватого определяется концентрацией в них основных примесей Al и Ti , а полосы оптического поглощения, связанные с люминесценцией, лежат в УФ области. Основными собственными дефектами $\alpha\text{-SiO}_2$ являются вакансии кислорода V_O и междоузельный кислород $(O_2)_i$ и O_i .

2. Из исследований ионного и электронного переноса получено, что кислород диффундирует в $\alpha\text{-SiO}_2$ в виде молекул $(O_2)_i$, а электропроводность осуществляется за счет прыжков электронов (поляронов малого радиуса) по катионам кремния с энергией активации 0,6 эВ и подвижностью $3,4 \cdot 10^{-15} + 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ в интервале температур 293 + 714 К. При этом величина $\mu = 10^{-7}$. В рамках теории разупорядоченности кристаллов сделаны теоретические расчеты дефектной структуры чистого и легированного $\alpha\text{-SiO}_2$.

3. Исследования оптического поглощения позволили установить механизмы возникновения полос при 318; 285; 253; 243; 234 и 230 нм (температура 293К), которым соответствуют следующие переходы электронов:

$c(O_2)_i$ на V_O^+ ; $cA_{Si}^- \equiv Ti_{Si}$ на V_O^+ ; $cA_{Si}^- \equiv Al_{Si}$ на O_i^x ;
 $c(O_2)_i$ на Si^{4+} ; $cA_{Si}^- \equiv Al_{Si}$ на V_O^+ и $cA_{Si}^- \equiv Al_{Si}$ на $(O_2)_i$.

4. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) кварцев в области 300 - 600нм имеют один доминирующий максимум при 460нм (293К), который связан с переходом электрона с нейтральной вакансии кислорода V_0^x на акцепторный уровень $A_{Si}^x \equiv Al_{Si}$. Интенсивность этой полосы пропорциональна концентрации кислородных вакансий $[V_0^x]$, так как $[V_0^x] \ll [Al]$, а вакансии кислорода в кристалле находятся преимущественно в виде V_0^+ .

5. Полосы ФЛ при 2,4; 3,2; 2,1 связываются соответственно с дефектами $(O_2)_i$; O_i ; Ti_{Si} , а при 2,5 и 3,5 эВ с наличием меди в $\alpha-SiO_2$.

6. Показано, что с помощью метода ионолюминесценции можно получить дополнительные сведения о месте нахождения максимумов полос, а анализ кинетики интенсивности этих полос дает ценные сведения о дефектной структуре кристалла.

7. Получена теоретическая зависимость интенсивности внутри-центрового свечения доминирующей полосы при 460нм как функция концентрации вакансий кислорода $[V_0^+]$ и температуры, которая зависит от скорости безизлучательного процесса $V_0^+ + e^- \rightarrow V_0^x$.

8. Экспериментальные кривые термостимулированной люминесценции для полос, связанных с собственными дефектами кварца (V_0 ; $(O_2)_i$ и O_i), имеют один максимум, который соответствует энергии 1,2 эВ, необходимой для освобождения захваченных электронов из ловушек Si^{3+} . Электроны, освобожденные из этих ловушек, как тепловыми колебаниями, так и туннельным способом, захватываются дефектами кристаллической решетки (V_0^+ ; $(O_2^x)_i$ и O_i^x), что превращает их в центры V_0^x ; $(O_2^-)_i$ и O_i^- . Затем происходит процесс люминесценции.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих

работах:

1. Салем С.Б., Сунцов Н.В. Электропроводность α -SiO₂ // Международное совещание-семинар по диагностике поверхности ионными пучками: Тез. докл. - Запорожье, 1992. - с.106-108.

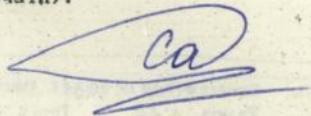
2. Бажин А.И., Рыжов В.Н., Салем С.Б., Сунцов Н.В. Ионно-люминесценция и дефектная структура кристаллического кварца // Международное совещание-семинар по диагностике поверхности ионными пучками: Тез. докл. - Запорожье, 1992. - с.100-102.

3. Бажин А.И., Салем С.Б., Сунцов Н.В. Природа полос оптического поглощения и фотолуминесценции α -SiO₂ // Тез. докл. научной конференции профессорско-преподавательского состава Донецкого государственного университета. - Донецк, 1993. - с.

4. Бажин А.И., Салем С.Б., Сунцов Н.В. Термостимулированная люминесценция α -SiO₂ // Тез. докл. научной конференции профессорско-преподавательского состава Донецкого государственного университета. - Донецк, 1993. - с.

5. Бажин А.И., Салем С.Б., Сунцов Н.В. Исследование ионно-люминесценции и ионно-фотонной эмиссии α -SiO₂ // Тез. докл. научной конференции профессорско-преподавательского состава Донецкого государственного университета. - Донецк, 1993. - с.

6. Рыжов В.Н., Салем С.Б., Сунцов Н.В. Ионно-фотонная эмиссия, ионно-люминесценция и дефекты в α -SiO₂ // XI конференция "Взаимодействие ионов с поверхностью". - Москва, МИФИ, 1993 (в печати).



Подп. в печать 31.03.93. Формат 60×84^{1/16}. Бумага *отдор от газет*. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 4,16, Усл. кр.-отт. 4,39. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 120 экз.
Заказ № 4-4323.

Донецкий государственный университет, 340055, Донецк, Университетская, 24.

ДМПП, 340050, Донецк, ул. Артема, 96.

165409

AB 27.099

AB 27.099