

На правах рукописи



СОЛОВЬЕВ Сергей Васильевич

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ АНИОН-ДЕФЕКТНЫХ КРИСТАЛЛОВ
КОРУНДА В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 300-900 К

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург 2012

Работа выполнена на кафедре «Экспериментальная физика» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,
Мильман Игорь Игоревич

Официальные оппоненты: Соколов Виктор Иванович,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБУН Институт физики металлов УрО РАН,
лаборатория оптики металлов, главный научный
сотрудник

Кашенко Михаил Петрович,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФБГОУ ВПО «Уральский государственный
лесотехнический университет», заведующий
кафедрой физики

Ведущая организация: ФБГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится 23 ноября 2012г. в 15-00 на заседании диссертационного совета Д 212.285.02 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, аудитория I главного учебного корпуса (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Автореферат разослан «16» октября 2012 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
профессор, доктор физ.-мат. наук



Г.И. Пилипенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Люминесценция твердых, жидких и газообразных сред, как физическое явление, является чрезвычайно востребованным во многих областях науки и техники. Современные достижения в физике конденсированного состояния, технологии выращивания кристаллов с заданными люминесцентными свойствами, методах направленного изменения этих свойств, позволили создать широкую номенклатуру материалов для практического применения их в качестве детекторов ионизирующих излучений и нейтронов. Наибольшее распространение такие детекторы получили при решении задач спектрометрии ядерных излучений в режиме реального времени и длительного сохранения информации о параметрах радиационных полей после окончания их воздействия. Последнюю группу в этой номенклатуре представляют твердотельные интегральные запоминающие детекторы, основанные на явлениях термостимулированной люминесценции (ТЛ), оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ), радиoluminesценции (РЛ) и фототрансферной люминесценции (ФТТЛ). Результаты поисков новых технологий, получения или направленного изменения люминесцентных свойств, как вновь синтезированных, так и известных материалов, регулярно обсуждаются на специализированных международных конференциях, систематизируются и обобщаются в монографиях и статьях научных журналов.

Анализ современного состояния и тенденций в достижении требуемого комплекса люминесцентных свойств материалов показывает, что в этом направлении главная роль отводится дефектам примесного происхождения в решетке основного материала. Типичным примером из устоявшейся номенклатуры соединений, используемых для создания термолюминесцентных радиационно-чувствительных сред и детекторов излучений на их основе, являются: LiF:Mg,Ti (TLD-100), LiF:Mg,Cu,P (TLD-100H), $\text{CaF}_2\text{:Dy}$ (TLD-200), $\text{CaF}_2\text{:Mn}$ (TLD-400), $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$ (TLD-800) и др. Из номенклатуры изученных соединений, потенциально пригодных для оптически-стимулированной люминесценции: MgO:Tb , $\text{NaMgF}_3\text{:Eu}$, $\text{KMgF}_3\text{:Ce}$, KCl:Eu , $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6\text{:Ti}$ и др.

Среди известных и вновь синтезированных соединений особое место занимает материал на основе анион-дефектного номинально чистого корунда, полученный около 25 лет назад в Уральском политехническом институте. Принципиальной особенностью этого материала является то, что его рекордная люминесцентная ТЛ, ОСЛ, РЛ, ФТТЛ - активность основана на свойствах собственных решеточных дефектов F^- и F^+ - типа, а не структурных дефектах примесной природы. Основным применением различных форм данного материала - монокристаллической, порошкообразной, пленочной - является ТЛ/ОСЛ - дозиметрия, основанная на опустошении электронных уровней захвата носителей заряда под действием температуры или оптической стимуляции.

Вместе с тем, сравнительно недавно, обнаружено существование в этом соединении уровней захвата носителей заряда, термическая глубина которых

значительно превышает значения уровней, ответственных за основной пик ТЛ и ОСЛ, получивших название глубоких ловушек. Проведенные исследования выявили существенное влияние состояния, главным образом, глубокой ловушки около 700 К по уровню ее заселенности носителями на свойства ТЛ. При этом остается неизученным влияние глубоких ловушек на весь комплекс люминесцентных свойств анион-дефектного корунда: ТЛ, ОСЛ, ФТТЛ, РЛ. Более того, остаются неизвестными параметры глубоких ловушек, их спектральный состав, взаимодействие между самими глубокими ловушками. Нуждается в пересмотре методика реконструкции экспериментально измеренных кривых ТЛ, подвергнутых процессу термического тушения, для получения действительных параметров центров захвата носителей заряда: энергии активации и частотного фактора. Многообещающим средством управления люминесцентными свойствами анион-дефектного корунда является исследование гипотетической возможности трансформировать простые решеточные дефекты F - типа в сложные дефекты F₂ - типа в разных зарядовых состояниях. Решение, перечисленных выше вопросов, является актуальной проблемой физики конденсированного состояния и имеет практическое значение для расширения функциональных возможностей соединений на основе анион-дефектного корунда.

Диссертация выполнена в рамках плана госбюджетных научно-исследовательских работ УрФУ, а также при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант №10-08-96045) и Президиума УрО РАН (проекты №12-У-2-032, №12-2-013-УЭМЗ).

Цели и задачи работы

Целью работы являлось экспериментальное исследование уровней захвата носителей заряда, ответственных за появление пиков ТЛ в диапазоне температур 300-900 К, изучение способов возбуждения пиков, спектра их свечения, реконструкция и расчет кинетических параметров, исследование влияния заполненности глубоких уровней захвата на весь комплекс люминесцентных явлений в кристаллах номинально чистого анион-дефектного корунда: ОСЛ, ФТТЛ, РЛ, а также изучение закономерностей термо- фотоиндуцированных преобразований центров окраски и их связей со спектральным составом и чувствительностью ТЛ в основном дозиметрическом пике при 450 К.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Модернизировать экспериментальный комплекс для измерений высокотемпературной ТЛ, возбужденной УФ или рентгеновским излучением при любой температуре в интервале 300-900 К, снабдив его каналами для регистрации спектрального состава люминесценции.
2. Разработать методики интегрального и избирательного заполнения глубоких ловушек.
3. Исследовать зависимости выхода ТЛ и ФТТЛ, интенсивности и временных характеристик затухания ОСЛ от уровня заполнения глубоких ловушек.

4. На основании экспериментально полученных высокотемпературных кривых термовысвечивания, разработать методику, провести реконструкцию и получить реальные кривые ТЛ, не подверженные эффекту термического тушения, определить их кинетические параметры.
5. Изучить динамику превращений F - и F⁺ - центров в сложные центры F₂ - типа в процессе облучения образцов УФ - излучением при изотермическом нагреве в интервале 300-900 К и их вклад в изменение спектрального состава ТЛ в основном пике.
6. Осуществить идентификацию образующихся центров, разработать модельные представления о происходящих процессах при термооптической обработке.
7. Провести анализ полученных результатов с точки зрения возможности их использования для модификации свойств исследуемого материала, полезной для практического использования и новых вариантов применения в дозиметрии, основанной на люминесцентных свойствах изученного материала.

Научная новизна

1. Впервые получены экспериментальные доказательства реальности существования интерактивного механизма взаимодействия между центрами захвата носителей заряда различной термической глубины, влияющего на весь комплекс люминесцентных свойств (ТЛ, ОСЛ, ФТТЛ, РЛ) кристаллов анион-дефектного корунда.
2. Установлена неэлементарность пика ТЛ около 700 К. Показано, что ТЛ около 700 К обусловлена двумя электронными ловушками, имеющими разные параметры тушения и отличающиеся механизмом взаимодействия с термически более глубокими ловушками.
3. Впервые разработана методика и произведена реконструкция экспериментальных кривых термовысвечивания в области 700 и 900 К, испытывающих термическое тушение, в результате которой получены кривые ТЛ, не подверженные термическому тушению, а также определены их действительные кинетические параметры.
4. Впервые показана возможность фото-термостимулированного преобразования простых одиночных F - центров в сложные центры F₂ - типа в разных зарядовых состояниях и их влияние на спектральный состав РЛ, основного пика ТЛ при 450 К и высокотемпературных пиков ТЛ при 700 и 900 К, предложены модели механизмов трансформации центров.
5. Приведены косвенные экспериментальные доказательства существования в кристаллах анион-дефектного корунда глубокой ловушки около 1073-1123 К, оказывающей влияние на ТЛ вблизи 700 К.
6. В кристаллах анион-дефектного корунда, облученных рентгеновским излучением при температурах выше 500 К обнаружен новый центр захвата носителей заряда вблизи 823 К, имеющий, предположительно, дырочную природу.

Защищаемые положения

1. Наибольшее влияние на люминесценцию кристаллов анион-дефектного корунда в основном пике оказывает степень заполнения ловушек, ответственных за пик ТЛ вблизи 700 К. Пик ТЛ при 700 К обусловлен двумя электронными ловушками, имеющими разные параметры тушения и отличающиеся механизмами взаимодействия с более глубокими ловушками, которые эффективно опустошаются вблизи 900 и 1100 К.
2. Пики ТЛ при 700 и 900 К испытывают тушение, их выход люминесценции снижается с ростом скорости нагрева при считывании.
3. Изменение формы и спектра пика ТЛ при 700 К после УФ-облучения в интервале температур 823-900 К связано с появлением нового дефектного образования, излучающего в области 500 нм
4. В интервале температур облучения УФ 323-673 К наблюдается конверсия центров люминесценции $F \rightarrow F^+$, а в диапазоне 673-898 К преобладает конверсия вида $F^+ \rightarrow F$ с последующим образованием $F_2 (F_2^+, F_2^{2+})$ - центров. При термооптической обработке в интервале температур 323-673 К полоса свечения F^+ - центров в спектре ТЛ становится доминирующей, в результате наблюдается рост интегральной чувствительности в основном пике в 5-30 раз.
5. Термооптическая обработка приводит к заполнению носителями заряда глубоких уровней захвата, активирует образование новых центров люминесценции и таким образом позволяет целенаправленно изменять интенсивность и спектральный состав ТЛ, ОСЛ, ФТТЛ и РЛ кристаллов анион-дефектного корунда.

Практическая значимость работы

Изученные особенности люминесценции, связанные с механизмом интерактивного взаимодействия центров захвата носителей заряда различной энергетической глубины в кристаллах анион-дефектного корунда, положены в основу разработки ряда принципиально новых применений стандартных ТЛ-ОСЛ детекторов ядерных излучений ТЛД-500К. В частности, на основе комплекса экспериментальных результатов по исследованию люминесцентных свойств анион-дефектных монокристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ получены патенты РФ на:

1. Способ измерения дозы в твердотельных детекторах ионизирующих излучений на основе оксида алюминия, накопленной при повышенной температуре окружающей среды. Основой способа является изученная в работе зависимость выхода ОСЛ от состояния заселенности глубоких ловушек. С его помощью возможно измерение доз, накопленных при температуре окружающей среды выше 530 К.
2. Способ возбуждения дозиметрического сигнала оптически стимулированной люминесценции детекторов ионизирующих излучений на основе оксида алюминия. В основу способа положены результаты изучения спектров оптического опустошения основной ловушки и параметров ОСЛ. Положительными эффектами являются: сокращение времени считывания, повышение чувствительности, точности, надежности и достоверности измерений

доз, а также эффективное опустошение дозиметрических ловушек в детекторах ТЛД-500К перед их применением в ТЛ-дозиметрии, заменяющее термообработку детекторов.

3. Способ измерения дозиметрического термолюминесцентного сигнала, накопленного в твердотельном детекторе ионизирующих излучений на основе оксида алюминия. Изобретение относится к способам измерения дозы, накопленной в твердотельных термолюминесцентных детекторах ионизирующих излучений на основе кристаллов и нанокерамики оксида алюминия, и может быть использовано для повышения надежности, точности и достоверности метода проводимых с его помощью измерений. Основной результат – устранение зависимости выхода термолюминесцентных твердотельных термолюминесцентных детекторов ионизирующих излучений на основе кристаллов и нанокерамики оксида алюминия от скорости нагрева детекторов при считывании.

Кроме того, в ходе выполнения работы были разработаны:

1. Способ получения длительного послесвечения люминофоров оптических излучателей. Изобретение относится к способу получения люминесцентных излучателей оптических фотонов видимого и инфракрасного диапазонов длин волн, основанных на длительном послесвечении люминофоров, после прекращения их возбуждения ионизирующим излучением. Основной результат – расширение функциональных возможностей контроля фотоприемных устройств, повышение уровня радиационной и экологической безопасности.

2. Способ определения распределения плотности потока электронов по его сечению. Изобретение относится к способам измерения параметров направленного излучения, включая измерение таких характеристик потоков заряженных частиц, как их пространственное распределение по плотности и дозам с помощью люминесцентных детекторов ионизирующих излучений. Результат – расширение возможностей исследований, создания и контроля ускорительной техники, изделий сильноточной электроники.

Личный вклад автора

Все результаты работы, вынесенные на защиту и приведенные в разделе «научная новизна», получены лично автором, а также в сотрудничестве с коллегами по кафедрам "Экспериментальная физика" и "Физические методы и приборы контроля качества" Физико-технологического института УрФУ и Института промышленной экологии УрО РАН. Участие в работе каждого сотрудника отражено в совместных публикациях по теме диссертации.

Апробация работы

Материалы диссертации представлены на 7 конференциях: на Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых ВНКФС-14 (Уфа, 2008); на международной конференции по радиационной физике SCORP-2008 (Каракол, Киргизия, 2008); 7th European Conference on Luminescent detectors and transformers of Ionizing Radiation "LUMDETR 2009"

(Krakow, Poland, 2009); на 14th International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Inorganic Materials (Астана, Казахстан, 2009); на международной конференции по радиационной физике, новым материалам и информационным технологиям SCORPh-2010 (Каракол, Киргизия, 2010); на 8-й международной конференции «Ядерная и радиационная физика» (г. Алматы, Казахстан, 2011); на 3th International congress on radiation physics, high current electronics, and modification of materials (Томск, 2012).

Публикации

Результаты исследований изложены в 23 публикациях, в том числе, в 4 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК, в 6 статьях в различных сборниках и материалах конференций, в 8 тезисах докладов на международных и российских конференциях и в 5 патентах РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. С учетом 24 таблиц, 50 рисунков и библиографического списка из 100 наименований, общий объем диссертации составляет 137 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследований, сформулирована цель работы, отражены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены защищаемые положения.

В первой главе проанализированы литературные данные о структуре монокристаллов анион-дефектного корунда. Приводятся сведения о люминесцентных свойствах исследуемых кристаллов. Обобщаются данные по методам создания дефектов в кристаллической решетке широкозонных оксидов. Анализируется современное состояние в описании центров люминесценции, кинетики ТЛ и глубоких ловушек анион-дефектного корунда. Рассмотрены работы по температурному тушению и реконструкции ТЛ пиков. Отмечается неполнота и противоречивость сведений о присутствии сложных центров F₂-типа и их влиянии на люминесцентные свойства кристаллов анион-дефектного корунда. Обращается также внимание на неясность целого ряда принципиальных вопросов, касающихся взаимодействия основной и глубоких ловушек.

На основе проведенного обзора и анализа литературных данных в конце главы формулируются основные задачи исследования, указанные в общей характеристике работы.

Во второй главе приведено описание модернизированного измерительного комплекса, обеспечивающего выполнение поставленных задач исследования термо- и оптически стимулированных процессов в твердых телах.

Описаны экспериментальные методики измерения ТЛ, ОСЛ, ФТТЛ, спектров затухания ТЛ, спектров оптического поглощения, спектров фото- и рентгенолюминесценции. Обоснованы методики заполнения глубоких ловушек и выполнения изохронного отжига.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований влияния заселенности глубоких ловушек, ответственных за ТЛ при температурах выше 450 К в изучаемых образцах на чувствительность к излучению в основном пике ТЛ при 450 К, ОСЛ и ФТТЛ. Заполнение глубоких ловушек осуществлялось двумя способами. В первом производилось многократное облучение образцов при комнатной температуре тестовой дозой бета- излучения $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ - источника и считывание ТЛ в основном пике после каждого из 350 циклов «облучение-нагрев». По данным проведенных измерений обнаружен плавный рост зависимости выхода ТЛ в основном пике от числа циклов «облучение – нагрев», превышающий исходное значение более чем в два раза. Факт заполнения глубоких ловушек по окончании 350 циклов «облучение-нагрев» был подтвержден последующим измерением ТЛ в диапазоне 500-950 К. На кривой термовысвечивания, в этом случае, наблюдались пики ТЛ при 573, 673, 773 и 873 К.

Во втором способе заполнения глубоких ловушек, исследуемые образцы облучались УФ-излучением при температуре 573 К. Принципиальным отличием этого способа являлось то, что носителями заряда заполнялись только электронные ловушки, источником электронов для которых являлся процесс фотоионизации F - центров при повышенной температуре. Заполнение глубоких ловушек по этому способу приводило к появлению высокотемпературной ТЛ при 700, 778 и 900 К. Исследование основного пика ТЛ, возбужденного тестовой дозой бета источника до и после облучения образцов УФ-излучением при 573 К показало, что чувствительность возросла в 5-15 раз. Подобным образом в этих условиях изменялся и выход ОСЛ. Для доказательства того, что наблюдаемая «приобретенная чувствительность» как в ТЛ, так и в ОСЛ, прямо связана с заполнением глубоких электронных ловушек, приводятся результаты ступенчатого отжига образцов с контролем чувствительности основного пика ТЛ при 450 К и выходу ОСЛ на каждой стадии отжига. Динамика возврата «приобретенной чувствительности» ТЛ и ОСЛ к исходным значениям в зависимости от температуры отжига, то есть по мере опустошения глубоких ловушек, приведена на рис. 1.

На рис. 1 также приведены и сами высокотемпературные кривые термовысвечивания. Максимальный темп снижения «приобретенной чувствительности» к исходному значению наблюдается в температурном диапазоне 720-770 К.

Связь между ловушками, ответственными за пик ТЛ при 450 и 700 К, подтверждается и данными ФТТЛ. Опустошение предварительно заполненных ловушек, обеспечивающих пик ТЛ при 700 К, может происходить не только при воздействии температуры, но и при освещении светом с длиной волны 470 нм

при комнатной температуре. Освобожденные в зону проводимости электроны при этом будут захватываться пустыми ловушками, обеспечивающими пик ТЛ при 450 К. Как показали проведенные исследования, под воздействием света происходит уменьшение интенсивности пика ТЛ при 700 К с одновременным

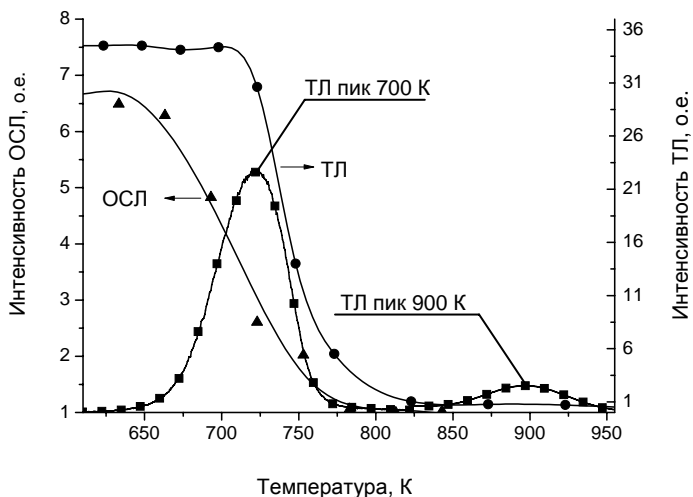


Рис. 1. Изохронный отжиг образцов анион-дефектного $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с контролем «приобработанной чувствительности» по ТЛ в основном пике и ОSL.

появлением пика ТЛ при 450 К. Кроме того, наблюдается смещение, сниженного после оптической стимуляции пика ТЛ при 700 К, в сторону более высоких температур. Этот факт может означать, что пик при 700 К обусловлен не одной (дискретной) ловушкой, а распределением ловушек и тогда, в первую очередь, наиболее интенсивно опустошаются ловушки с наименьшей энергией активации.

Качественно иные закономерности в изменениях чувствительности основного пика и высокотемпературной ТЛ наблюдались после облучения образцов рентгеновским излучением при 573 К. В этом случае чувствительность основного пика увеличивалась только в 3-5 раз. На кривой термовысвечивания появлялся новый пик при 823 К, отсутствующий при возбуждении образцов УФ - излучением, а пик ТЛ при 700 К отсутствует (рис. 2).

Результаты ступенчатого отжига «приобработанной чувствительности» в основном пике показали существенные отличия от аналогичной зависимости, полученной после высокотемпературных облучений исследуемых образцов УФ - излучением. Плавное падение «приобработанной чувствительности» в области пика ТЛ, возбужденного рентгеновским излучением при 573 К, сменяется локальным подъемом и последующим снижением до исходной величины с ростом температуры. Такой характер снижения «приобработанной чувствительности» в основном пике, предположительно, объясняется опустошением непрерывно распределенных по термической глубине электронных ловушек вне температурного диапазона локализации пика ТЛ при

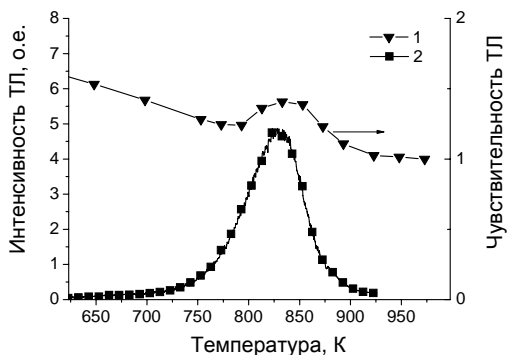


Рис. 2. Изохронный отжиг образцов анион-дефектного $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с контролем «приобретенной чувствительности» ТЛ (1) и кривая термовывесчивания анион-дефектных образцов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (2) после высокотемпературного облучения рентгеновским излучением. Скорость нагрева 2 К/с.

основного пика. В этом случае, в интервале температур опустошения ловушки при 823 К, должен наблюдаться локальный рост «приобретенной чувствительности» в основном пике. В спектре ТЛ при 823 К присутствовала характерная для кристаллов анион-дефектного корунда полоса свечения F^+ -центров с максимумом при 330 нм. Поэтому, сделано предположение, что происхождение ТЛ при 823 К обусловлено захватом дырки F -центром с преобразованием его в F^+ -центр и релаксации из возбужденного состояния с люминесценцией в полосе 330 нм.

По результатам комплексного исследования ТЛ, ОСЛ и ФТТЛ, сделан вывод о наличии интерактивной связи (конкурирующего захвата носителей) между ловушкой, ответственной за основной пик ТЛ, ловушкой вблизи 700 К и ловушкой около 823 К. Заполнение глубоких ловушек снижает вероятность последующего захвата носителей заряда, соответственно, увеличивается число носителей заряда, рекомбинирующих на центре люминесценции, что приводит к увеличению выхода люминесценции исследуемых образцов. При опустошении глубоких ловушек происходит восстановление приобретенной чувствительности.

Вместе с тем, было обнаружено, что ловушки, ответственные за пик ТЛ около 700 К, конкурирующие с основной и влияющие на чувствительность анион-дефектного корунда в основном пике, также подвержены конкурентному влиянию со стороны термически более глубоких ловушек.

После многократных циклов облучения УФ в диапазоне температур 823–573 К происходит увеличение выхода ТЛ и изменяется форма кривой свечения вблизи 700 К (рис. 3). Заполнение электронных ловушек выше 823 К приводит к снижению выхода люминесценции в высокотемпературной части пика ТЛ и росту низкотемпературной компоненты. Это обстоятельство подтверждено

823 К. Сделано предположение, что повышение чувствительности основного пика при 450 К, в температурном диапазоне опустошения ловушки при 823 К, связано с ее дырочной природой. Дополнительным аргументом в пользу такого предположения являлось то, что у образцов, облученных УФ-излучением в тех же условиях, ТЛ при 823 К не наблюдалась. В заполненном состоянии такая ловушка являлась центром электронно-дырочной рекомбинации, конкурируя с пустыми электронными ловушками в захвате носителей при облучении и освобожденных при 450 К, снижая чувствительность

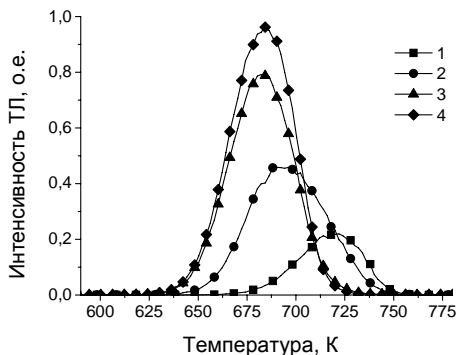


Рис. 3. Кривые термовысвечивания образцов анион-дефектного $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ после облучения УФ при многократных циклах «облучение – нагрев». Облучение УФ производилось при 823 К в течение 1 минуты с последующим охлаждением до 573 К. 1 – исходный, 2 – после 2 циклов, 3 – после 5 циклов, 4 – после 10 циклов. Скорость нагрева 2 К/с.

первоначальному значению. Сложное поведение кривых свечения вблизи 700 К объяснено предположением о существовании ловушки около 1100 К, конкурирующей с ловушками, ответственными за пик ТЛ около 700 К.

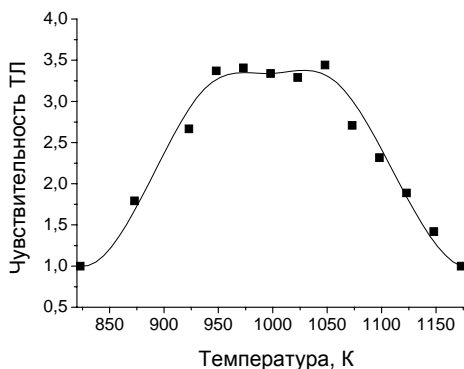


Рис. 4. Изохронный отжиг образцов анион-дефектного $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с контролем «приобретенной чувствительности» пика ТЛ при 700 К.

поскольку, как было показано в предыдущей главе, заполнение этой ловушки электронами, оказывало наибольшее влияние на выход ТЛ в основном пике, чувствительность ОСЛ и ФТТЛ. Опустошение глубоких ловушек производилось отжигом образцов при 1170 К.

измерениями ТЛ вблизи 700 К при многократных циклах «облучение – нагрев». С увеличением степени заполнения ловушек выше 823 К происходил рост интенсивности пика ТЛ около 700 К и наблюдалось смещение максимума пика, при этом форма кривых свечения свидетельствовала об исчезновении высокотемпературной части пика ТЛ после 5-6 циклов.

Проведенный ступенчатый отжиг пика ТЛ около 700 К показал, что в диапазоне температур 950-1050 К рост интенсивности ТЛ прекращался, а чувствительность стабилизировалась на уровне в 3-3,5 раза выше исходной (рис. 4). При дальнейшем нагреве, интенсивность ТЛ около 700 К возвращалась к

В четвертой главе приводятся результаты определения кинетических параметров ТЛ кристаллов анион-дефектного корунда около 700 и 900 К. Исследованы образцы, глубокие ловушки в которых были предварительно переведены в два сильно различающихся состояния: ловушка, ответственная за ТЛ при 700 К заполнена УФ-облучением при 573 К, термически более глубокие при этом оставались пустыми; глубокие ловушки заполнялись УФ-облучением при температуре образцов 823 К. Основное внимание уделялось ТЛ около 700 К,

Базовые сведения для определения кинетических параметров кривых ТЛ получены по данным зависимости выхода ТЛ в пике около 700 К от скорости нагрева при пустых термически более глубоких ловушках.

Наблюдаемое смещение температуры максимума пика ТЛ в сторону более высоких температур и рост его величины с увеличением скорости нагрева, качественно соответствовали закономерностям формальной кинетики. Однако падение светосуммы с ростом скорости нагрева свидетельствовало о процессе температурного тушения люминесценции, оцениваемого коэффициентом термического тушения или эффективностью люминесценции $\eta(T)$. По аналогии с уравнением, описывающим тушение люминесценции в основном пике при 450 К, предполагалось, что аналитическое выражение для коэффициента температурного тушения и более высокотемпературных пиков имеет такой же вид:

$$\eta(T) = \frac{1}{1 + C \cdot \exp\left(-\frac{W}{k \cdot T}\right)}, \quad (1)$$

где W (эВ) – энергия активации температурного тушения, интерпретируемая как энергетический барьер, который должен быть преодолен электроном в возбужденном состоянии, чтобы совершить безызлучательный переход в основное состояние или быть захваченным на термически более глубокий уровень; C – безразмерный множитель; $k=8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/К – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Интенсивность кривых ТЛ, испытывающих тушение, описывается эмпирическим уравнением вида:

$$I_q = I_{unq} \cdot \eta(T), \quad (2)$$

где $\eta(T)$ – температурно-зависимая люминесцентная эффективность в соответствии с уравнением (1), I_{unq} – реальная интенсивность ТЛ, не испытывавшая тушение. В соответствии с уравнением (2), I_{unq} находят из уравнения:

$$I_{unq} = I_q / \eta(T), \quad (3)$$

На рис. 5 приведен общий вид экспериментальной (испытывающей тушение, кривая 1) и реконструированной кривой ТЛ около 700 К (кривая 2), для случая пустых глубоких ловушек.

По реконструированной кривой ТЛ возможно определить реальные значения энергии активации E и частотного фактора s . Рассчитанные значения W , C , E и s с помощью стандартного уравнения для ТЛ первого порядка кинетики (4) использованы для построения кривой ТЛ.

$$I(T) = \frac{1}{1 - C \cdot \exp\left(-\frac{W}{kT}\right)} n_0 s \exp\left(-\frac{E}{k(T - g\beta)}\right) \exp\left[-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^{T - g\beta} \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right], \quad (4)$$

где n_0 – концентрация электронов в ловушке, $\Delta T = g \cdot \beta$ – поправка на разность температур между образцом и нагревателем, β (К/с) – скорость нагрева.

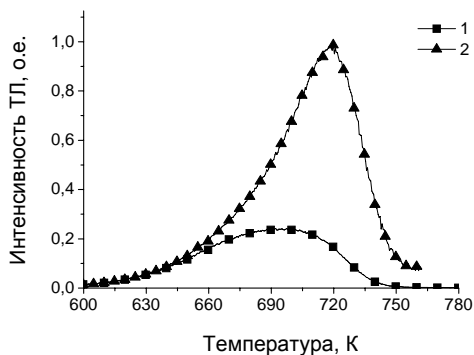


Рис. 5. Кривые ТЛ около 700 К: экспериментальная (1) и реконструированная (2) для скорости нагрева 2 К/с.

Сравнение рассчитанной кривой с экспериментально полученной, показало хорошее совпадение их высокотемпературных частей и существенные отличия в низкотемпературной области.

Последнее обстоятельство явилось основанием предполагать неэлементарность экспериментальной кривой свечения с пиком около 700 К и рассматривать его как состоящим из суммы двух пиков, обеспечивающих его низкотемпературную и высоко-

температурную составляющие с разными коэффициентами тушения.

Коррекция параметров тушения высокотемпературной составляющей пика и подбор параметров тушения низкотемпературной компоненты позволили определить значения: $W_{1\text{пика}} = 0,8$ эВ и $C_{1\text{пика}} = 1,6 \cdot 10^7$, $W_{2\text{пика}} = 1,7$ эВ и $C_{2\text{пика}} = 1,3 \cdot 10^{12}$. Основные кинетические параметры низкотемпературной компоненты пика ТЛ около 700 К составили: $E = 2,02$ эВ, $s = 1,15 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$, $W = 0,8$ эВ, а высокотемпературной: $E = 2,13$ эВ, $s = 1,15 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$, $W = 1,7$ эВ. Сравнение расчетной и экспериментальной кривых свечения около 700 К показывает, что максимальная степень их несоответствия при изменении скорости нагрева от 0,5 до 3 К/с с шагом 0,5 К/с не превышает 10,2 %.

Реконструированные параметры ловушек, ответственных за ТЛ при 700 К, определенные для образцов с пустыми глубокими ловушками, использованы для моделирования кривых ТЛ с заполненными глубокими ловушками. В качестве критерия точности моделирования полагалось условие, чтобы при изменении скорости нагрева в исследуемом диапазоне результаты моделирования отличались от экспериментальных кривых ТЛ не более, чем на 10 %. Таким образом, установлено, что ТЛ около 700 К обусловлена двумя электронными ловушками с реальной термической глубиной $E = 2,02$ и $2,13$ эВ, имеющими разные параметры тушения W , соответственно 0,8 и 1,7 эВ, и отличающиеся механизмом взаимодействия с термически более глубокими ловушками.

Сравнение параметров кривых термовысвечивания с максимумом около 700 К образцов с пустыми и заполненными глубокими ловушками показало, что заполнение глубоких ловушек приводило не к росту выхода ТЛ в пике при 700 К, а, напротив, к его снижению. Этот результат был прямо противоположен наблюдаемому росту выхода ТЛ в основном пике при заполнении ловушек, ответственных за пик при 700 К.

Обнаружено, что при последовательном возбуждении образцов УФ излучением при температурах 823 и 573 К наблюдается пик при 900 К. Исследования этого пика методом вариации скоростей нагрева при считывании ТЛ установили падение выхода ТЛ с ростом скорости нагрева и второй порядок кинетики процесса. Реконструкция пика и последующий расчет по алгоритму, разработанному для анализа пика при 700 К, позволили определить реальную термическую глубину ловушки, ответственной за ТЛ около 900 К, равную 3,2 эВ и энергию активации тушения $W=2,5$ эВ. При данных параметрах моделирования пика при 900 К, несоответствие расчетных и экспериментальных результатов не превышало 8,4 %. Падение выхода ТЛ в пике при 900 К предполагает присутствие термически еще более глубоких ловушек.

Достоверность результатов расчета истинных параметров ловушек, ответственных за ТЛ при 700 и 900 К, путем реконструкции экспериментальных кривых подтверждена применением используемого алгоритма реконструкции и последующего анализа для определения истинных параметров ловушек, ответственных за основной пик ТЛ при 450 К, известных из литературы. Полученные в работе кинетические параметры пика при 450 К, $W=1,080$ эВ, $E=1,35$ эВ хорошо совпадают с имеющимися в литературе: $W=1,085$ эВ, $E=1,44$ эВ (для смешанного порядка кинетики, равного 0,25). Для скоростей 1-8 К/с экспериментальные кривые ТЛ при 450 К отличались от рассчитанных не более чем на 9,1 %.

На рисунке 6 приведены экспериментальные кривые термовысвечивания образцов анион-дефектного корунда с пустыми и заполненными глубокими ловушками и их разложение на низкотемпературную и высокотемпературную компоненты.

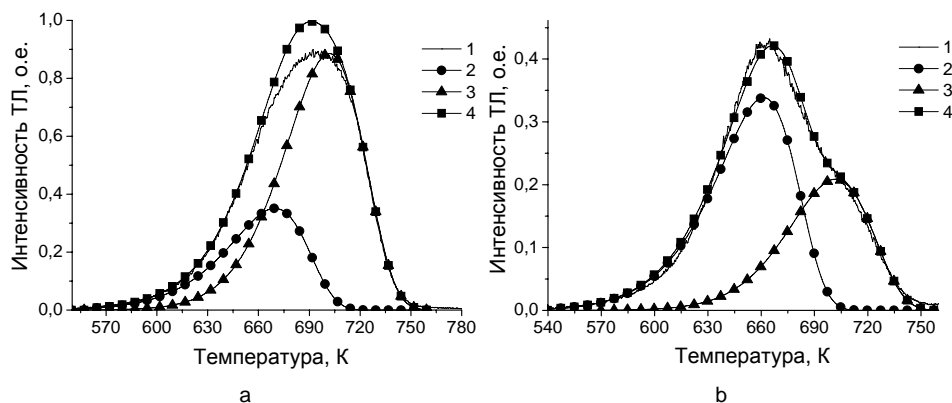


Рис. 6. Экспериментальные кривые ТЛ около 700К (1), низко- и высокотемпературные компоненты пика (2 и 3) и их сумма (4) при скорости нагрева 2 К/с. а) – с пустыми глубокими ловушками, б) – с заполненными глубокими ловушками.

В таблице 1 приведены значения кинетических параметров экспериментальных и реконструированных пиков ТЛ около 450, 700 и 900 К.

Таблица 1 - Экспериментальные и реконструированные значения параметров кривых свечения и ловушек, ответственных за пики ТЛ, анион-дефектного корунда при скорости нагрева 2 К/сек

Экспериментальный пик					Реконструированный пик				
Глубокие ловушки опустошены	T_m, K	μ_g	$E, эВ$	s, c^{-1}	T_m^*, K	C	$W, эВ$	$E, эВ$	s, c^{-1}
	443	0,43	0,98	$1,7 \cdot 10^{10}$	449	$2,2 \cdot 10^{12}$	1,08	1,35	$2,2 \cdot 10^{14}$
	713	0,40	1,25	$4,2 \cdot 10^7$	688	$1,6 \cdot 10^7$	0,8	2,02	$1,15 \cdot 10^{14}$
Глубокие ловушки заполнены					720	$1,3 \cdot 10^{12}$	1,7	2,13	$1,15 \cdot 10^{14}$
	663	0,83	-	-	679	$1,6 \cdot 10^7$	0,8	2,02	$1,85 \cdot 10^{14}$
					720	$1,3 \cdot 10^{12}$	1,7	2,13	$1,15 \cdot 10^{14}$
	870	0,48	3,1	$3 \cdot 10^{17}$	869	$3,3 \cdot 10^{14}$	2,5	3,2	$5,6 \cdot 10^{17}$

* - Значение температуры максимума реконструированного ТЛ пика приведены с учетом поправки $\Delta T = g \cdot \beta$.

В пятой главе приводятся результаты измерений спектра ТЛ и РЛ для основного пика и пика около 700 К, спектры ОП и ФЛ образца анион-дефектного корунда, подвергнутого термооптической обработке.

В результате измерения ТЛ в полосах свечения F- и F⁺-центров основного пика при 450 К в циклах возбуждение УФ-излучением при комнатной температуре - считывание происходит падение выхода ТЛ в полосе F-центров (420 нм) и его рост в полосе люминесценции F⁺-центров (330 нм). Доминирующей при этом остается полоса свечения F-центров.

Возбуждение образцов УФ-излучением при 573 К приводит к существенному перераспределению спектрального состава ТЛ в основном пике. В спектре свечения появляется полоса свечения F⁺-центров, которая за 1-5 минут возбуждения становится доминирующей.

Облучение образцов при 823 К приводит к появлению в спектре ТЛ основного пика новой полосы при 500 нм и новому перераспределению полос свечения F- и F⁺-центров, доминирующей вновь становится полоса люминесценции F-центров (рис. 7а, кривые 2-4).

В случае возбуждения образцов при 973 К в спектре ТЛ основного пика также присутствуют три полосы. Доминирующим остается свечение в полосе 420 нм, а интенсивности полос при 330 и 500 нм значительно снижаются, по сравнению с возбуждением при 823 К.

Спектр пика ТЛ около 700 К имеет единственную полосу 330 нм. При последовательном облучении УФ при 823 и 573 К, т.е. при заполнении ловушек, термическая глубина которых выше 823 К, в спектре пика ТЛ около 700 К появляется полоса 500 нм (рис 7б, кривая 2).

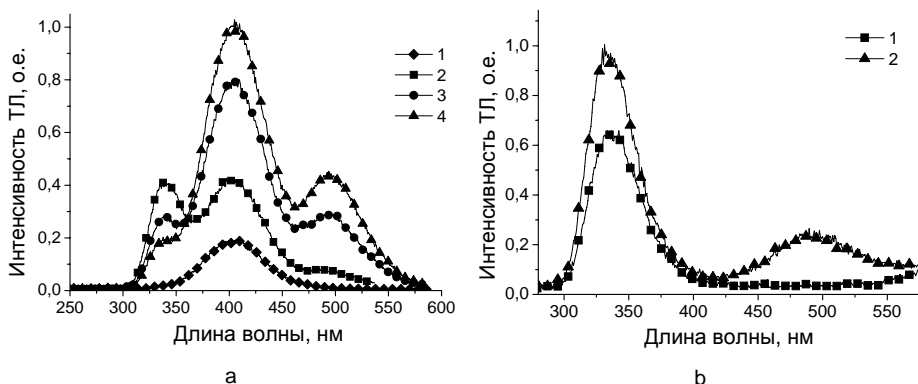


Рис. 7. Спектры ТЛ в основном пике при 450 К (а) и пике при 700 К (б) образцов анион-дефектного $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

а) Время облучения УФ излучением при температуре 823 К: 1 – 0 мин, исходный; 2 – 1 мин; 3 – 5 мин; 4 – 15 мин.

б) 1 – исходный, после нагрева до 1170 К в темноте; 2 – после облучения УФ излучением последовательно при 823 и 573 К

Динамика преобразования центров, ответственных за спектральный состав ТЛ в основном пике, изучена после возбуждении образцов УФ-излучением в температурном интервале 323-1173 К с шагом около 50 К (рис. 8).

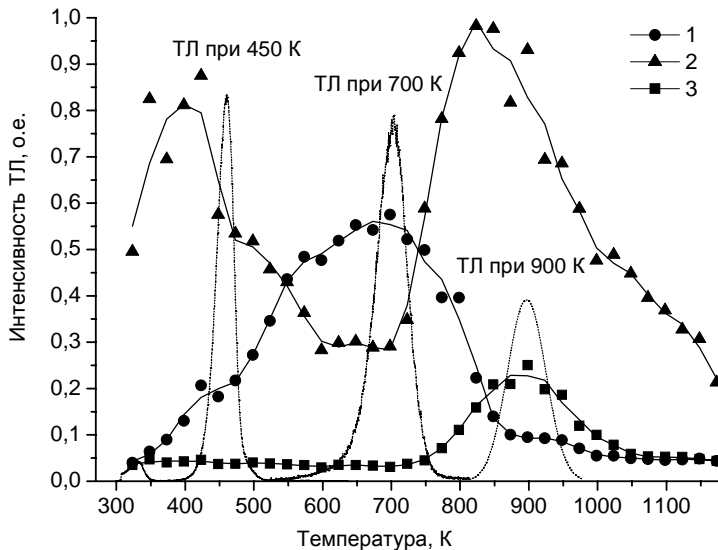


Рис. 8. Спектры ТЛ в основном пике образцов анион-дефектного $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в зависимости от температуры предварительного облучения УФ-излучением: 1 - интенсивность свечения в полосе 330 нм; 2 – 420 нм; 3 – 500 нм. Тонкими линиями показаны кривые ТЛ при 450, 700 и 900 К.

В интервале термооптической обработки 323-673 К обнаружен рост интенсивности полосы 330 нм (кривая 1) и синхронное с ним падение интенсивности свечения в полосе 420 нм (кривая 2). В температурном интервале 673-898 К интенсивность люминесценции в полосе 330 нм, пройдя максимальное значение, снижается почти до исходного уровня, в то время как интенсивность в полосе 420 нм синхронно возрастает, превышая исходный уровень, и появляется полоса 500 нм (кривая 3). В диапазоне термической обработки 898-1173 К интенсивность всех трех полос падает до исходных уровней при 323 К.

Сходный, с обнаруженной закономерностью динамикой преобразования центров в ТЛ основного пика, механизм установлен по данным РЛ. В исходном состоянии или после нагрева образцов до 573 К, без УФ-облучения, в спектре ТЛ доминирует полоса свечения F - центров (420 нм), интенсивность свечения F^+ - центров при этом мала. Термооптическая обработка образцов при 573 К приводит к перераспределению интенсивностей свечения в полосах F - и F^+ - центров. Интенсивность свечения в полосе F^+ - центров существенно возрастает и становится соизмеримой с интенсивностью свечения F - центров. Кроме того, в спектре РЛ обнаружено свечение в новой полосе около 280 нм. При термооптической обработке при 823 К доминирующей вновь становится полоса свечения 420 нм и появляется полоса 500 нм. Облучение при 973 К приводило к снижению выхода РЛ во всех трех полосах, особенно в полосе 330 нм.

В спектрах оптического поглощения образцов после термооптической обработки обнаружены полосы поглощения при 205, 230, 260, 300 и 355 нм. Три первые из них хорошо известны и принадлежат F - и F^+ - центрам. Полоса поглощения при 300 нм приписана F_2 - центрам (кислородная дивакансия с четырьмя электронами), а полоса 355 нм – F_2^+ - центрам (кислородная дивакансия с тремя электронами), таблица 2.

Таблица 2. - Идентификация центров люминесценции анион-дефектного корунда

Пик поглощения, нм (eV)	Пик люминесценции, нм (eV)					Символ центра
	330 (3,8)	420 (3,0)	440 (2,8)	500 (2,4)	550 (2,2)	
205 (6,0)		+				F
230; 260 (5,4; 4,8)	+					F^+
300 (4,1)				+		F_2
355 (3,5)			+			F_2^+
285 (4,3)			+		+	F_2^{2+}

Дополнительные подтверждения образования сложных F_2 - центров в результате термооптической обработки кристаллов анион-дефектного корунда при 900 К получены по данным спектров возбуждения фотолюминесценции в полосе 500 нм, в которых присутствуют полосы поглощения 300 нм (рис 9а).

Измеренные спектры возбуждения фотолюминесценции в полосах 440 и 550 нм соответствуют поглощению в полосах 285 и 355 нм и свидетельствуют о

присутствии в образцах анион-дефектного корунда F_2^{2+} - центров, индуцированных термооптической обработкой при температуре около 900 K (рис. 9б и 9с).

При обсуждении моделей механизмов $F^+ \rightarrow F$ - конверсии предпочтение отдано туннелированию электронов из валентной зоны на свободный уровень возбужденного (F^+)^{*} - центра с образованием F - центра в основном состоянии, способного образовывать агрегатный F_2 - центр.

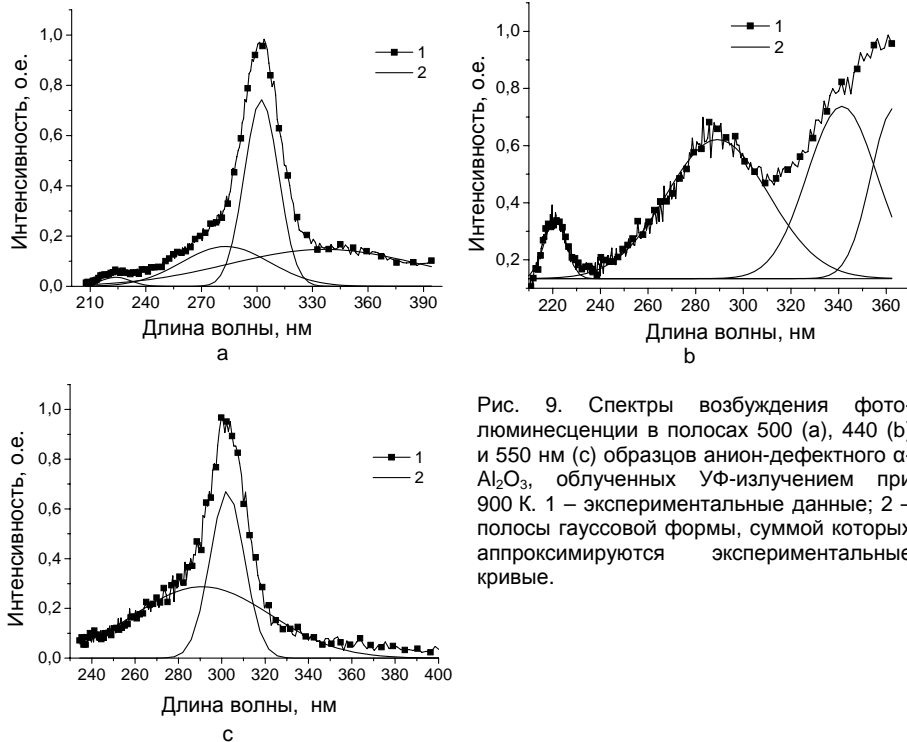


Рис. 9. Спектры возбуждения фотолюминесценции в полосах 500 (а), 440 (б) и 550 нм (с) образцов анион-дефектного α - Al_2O_3 , облученных УФ-излучением при 900 K. 1 – экспериментальные данные; 2 – полосы гауссовой формы, суммой которых аппроксимируются экспериментальные кривые.

Высказано предположение, что альтернативным туннелированию из валентной зоны источником электронов, необходимых для $F^+ \rightarrow F$ - конверсии, может являться ионизация F^+ - центра с образованием свободного электрона и кислородной вакансии, потерявшей оба электрона, F_2^{2+} - центра.

По данным комплексных исследований ТЛ, РЛ, ОП предложены модели образования F_2 - центров в разных зарядовых состояниях (F_2^+ и F_2^{2+}), связанные с последовательным $F \rightarrow F^+ \rightarrow F \rightarrow F_2$ - преобразованием. Физической основой преобразования являются ионизация электронных центров под действием УФ-излучения, усиленная температурой, и возрастающая диффузионная подвижность дефектов в процессе нагрева кристаллов от 323 до 973 K.

Выявлено сходство в деталях стимулированного температурой образования сложных центров F_2 - типа в кристаллах α - Al_2O_3 с радиационными

дефектами и в анион-дефектных кристаллах $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, облученных УФ-излучением при температурах 323-1173 К. Основной причиной наблюдаемых аналогий является высокая концентрация исходно созданных изолированных F^- и F^+ -центров и их диффузионная подвижность в исследуемом диапазоне температур.

Основные результаты и выводы по диссертационной работе

Проведенные систематические исследования люминесценции кристаллов анион-дефектного корунда в интервале температур 300-900 К и анализ полученных результатов позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлено, что повышение чувствительности кристаллов анион-дефектного корунда к излучению в основном пике зависит от числа циклов «облучение при комнатной температуре - нагрев». При этом происходит накопление электронов, освободившимися при считывании ТЛ в основном пике, в электронных ловушках, ответственных за высокотемпературные пики ТЛ.

2. Проведено исследование альтернативного способа заполнения глубоких ловушек, в соответствии с которым облучение исследуемых кристаллов производится при температурах 573 и 823 К УФ-излучением. Интерактивный характер связи ловушек, ответственных за основной пик ТЛ и ОСЛ, с термически более глубокими электронными ловушками аргументирован данными ступенчатого отжига образцов с контролем «приобретенной» ТЛ- и ОСЛ-чувствительности. По мере термического опустошения глубоких ловушек «приобретенная» ТЛ- и ОСЛ-чувствительность возвращается к исходным значениям.

3. При облучении исследуемых образцов рентгеновским излучением при 573 К обнаружен новый пик ТЛ около 823 К, не наблюдающийся при возбуждении образцов в этих же условиях УФ-излучением. Чувствительность основного пика при этом увеличилась только в 3-5 раз, а на кривой ступенчатого отжига «приобретенной» чувствительности на фоне падения имеется локальный максимум, по температурному положению совпадающий с температурным диапазоном локализации пика ТЛ при 823 К. По совокупности признаков ловушка, ответственная за ТЛ около 823 К, предварительно классифицирована как дырочная по своей природе.

4. Обнаружено, что на ТЛ в районе 700 К существенно влияет состояние заселенности ловушек, термическая глубина которых превышает 823 К. Заполнение последних приводит к деформации формы пика при 700 К, указывая на его сложное строение, состоящее из двух компонент, обусловленных двумя типами ловушек и обеспечивающими его низкотемпературную и высокотемпературную составляющие. Соотношение выхода ТЛ между компонентами пика при 700 К изменяется при заполнении более глубоких ловушек, его низкотемпературная компонента увеличивается по мере заполнения глубоких ловушек, в то время как высокотемпературная падает. Изохронный отжиг образцов с контролем «приобретенной» чувствительности в пике при 700 К при заполненных более глубоких ловушках показывает, что в интервале

отжига 823-973 К выход ТЛ увеличивается, затем стабилизируется при 973-1073 К, после чего начинает снижаться, возвращаясь к исходному значению при 1073-1123 К, что позволяет предполагать о существовании глубокой электронной ловушки около 1100 К, связанной с низкотемпературной компонентой пика при 700 К.

5. Изучены особенности ТЛ около 700 К кристаллов анион-дефектного корунда с пустыми термически более глубокими ловушками в зависимости от скорости нагрева при считывании. Обнаружено падение выхода ТЛ с ростом скорости нагрева, которое связывается с эффектом температурного тушения люминесценции. Разработан алгоритм реконструкции кривых ТЛ, который включает следующие основные этапы: аналитическое описание зависимости положения температуры максимума ТЛ от скорости нагрева; определение скорости нагрева, при которой эффект температурного тушения пренебрежимо мал; аналитическое описание реальной зависимости выхода ТЛ от скорости нагрева и определение с ее помощью параметров тушения: энергии активации W , безразмерного множителя C и коэффициента температурного тушения $\eta(T)$. Реальная кривая ТЛ, не испытывающая тушения $I_q(T)$, получена из соотношения $I_{unq}(T) = I_q(T) / \eta(T)$, где $I_q(T)$ - экспериментально полученная кривая ТЛ. Показано, что экспериментальная кривая свечения с пиком около 700 К представляет собой сумму двух пиков с параметрами: $W_{1пика} = 0,8$ эВ и $C_{1пика} = 1,6 \cdot 10^7$, $W_{2пика} = 1,7$ эВ и $C_{2пика} = 1,3 \cdot 10^{12}$, $E_{1пика} = 2,02$ эВ и $s_{1пика} = 1,15 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$, $E_{2пика} = 2,13$ эВ и $s_{2пика} = 1,15 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$. Указанные значения подтверждены при моделировании кривых ТЛ с заполненными глубокими ловушками

6. Обнаружено, что при последовательном возбуждении образцов УФ-излучением при температурах 823 и 573 К наблюдается пик при 900 К. Реконструкция пика и последующий расчет по алгоритму, разработанному для анализа пика при 700 К, позволили определить реальную термическую глубину ловушки, ответственной за ТЛ около 900 К, равную 3,2 эВ и энергию активации тушения $W=2,5$ эВ. Достоверность результатов расчета истинных параметров ловушек, ответственных за ТЛ при 700 и 900 К путем реконструкции экспериментальных кривых подтверждена применением используемого алгоритма реконструкции и последующего анализа для определения восстановленных параметров ловушек, ответственных за основной пик ТЛ при 450 К известных из литературы.

7. Возбуждение образцов УФ-излучением при 573 К приводит к существенному перераспределению спектрального состава ТЛ в основном пике. В спектре свечения появляется полоса свечения F^+ - центров, которая за 1-5 минут возбуждения становится доминирующей. Дополнительное возбуждение образцов при 823 К приводит к появлению в спектре ТЛ основного пика новой полосы при 500 нм и перераспределению полос свечения F- и F^+ - центров, доминирующей становится полоса люминесценции F- центров. Возбуждение образцов при 973 К вновь видоизменяет спектр ТЛ в основном пике. Доминирующим становится свечение в полосе 420 нм, а интенсивности полос

при 330 и 500 нм значительно снижаются, по сравнению с возбуждением при 823 К.

8. Динамика преобразования центров, ответственных за спектральный состав ТЛ в основном пике, изучена после возбуждении образцов УФ - излучением в температурном интервале 323-1173 К с шагом около 50 К. В интервале термооптической обработки 323-673 К обнаружен рост интенсивности полосы 330 нм и синхронное с ним падение интенсивности свечения в полосе 420 нм. В температурном интервале 673-898 К интенсивность люминесценции в полосе 330 нм, пройдя максимальное значение, снижается почти до начального уровня, в то время как интенсивность в полосе 420 нм синхронно возрастает, превышая исходный уровень, и появляется полоса 500 нм. В диапазоне термической обработки 898-1173 К интенсивность ТЛ во всех трех полосах падает до уровней при 323 К. Схожий, с обнаруженной закономерностью динамики преобразования центров в ТЛ основного пика, механизм установлен по данным РЛ.

9. В спектрах оптического поглощения образцов после термооптической обработки обнаружены полосы поглощения при 205, 230, 260, 300 и 355 нм. Три первых из них хорошо известны и принадлежат F - и F⁺ - центрам. Полоса поглощения при 300 нм приписана F₂ - центрам (кислородная дивакансия с четырьмя электронами), а полоса 355 нм – F₂⁺ - центрам (кислородная дивакансия с тремя электронами). При обсуждении моделей механизмов F⁺ → F - конверсии предпочтение отдано туннелированию электронов из валентной зоны на свободный уровень возбужденного (F⁺)^{*} - центра с образованием F - центра в основном состоянии, способного образовывать агрегатный F₂ - центр.

10. На основании полученных результатов предложен и запатентован ряд разработок, направленных на расширение функциональных возможностей стандартных ТЛ детекторов ядерных излучений ТЛД-500К.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Мильман И.И., Моисейкин Е.В., Никифоров С.В., Соловьев С.В., Ревков И.Г., Литовченко Е.Н. Роль глубоких ловушек в люминесценции анион-дефектных кристаллов Al₂O₃:C // ФТТ, – 2008, – Т. 50, выпуск 11. – С. 1991-1995.
2. Соловьев С.В., Моисейкин Е.В., Литовченко Е.Н., Ревков И.Г., Мильман И.И. Глубокие ловушки в кристаллах Al₂O₃:C // Изв.вузов. Физика. – 2009. – №8/2. – С. 223-226.
3. Мильман И.И., Моисейкин Е.В., Соловьев С.В., Ревков И.Г., Литовченко Е.Н. Повышение эффективности возбуждения оптически стимулированной люминесценции дозиметрических кристаллов α-Al₂O₃:C // Изв.вузов. Физика. – 2009. – №8/2. – С. 122-125.
4. Соловьев С.В., Мильман И.И., Сюрдо А.И. Термо-фотоиндуцированное преобразование центров люминесценции в анион-дефектных кристаллах alpha-Al₂O₃ // ФТТ, – 2012, – Т. 54, выпуск 4, – С. 683-690.

В других изданиях

5. Соловьев С.В., Моисейкин Е.В., Литовченко Е.Н., Ревков И.Г. Рентгенолюминесценция α -Al₂O₃:C при высоких температурах // 14-я Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых. Сборник тезисов, материалы конференции. – С. 147.
6. Литовченко Е.Н., Соловьев С.В., Ревков И.Г. Эффект оптического обесцвечивания в ТЛ кристаллах анион-дефектного корунда // 14-я Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых. Сборник тезисов, материалы конференции. – С. 119.
7. Ревков И.Г., Соловьев С.В., Литовченко Е.Н. Рентгенолюминесценция кристаллов анион-дефектных α -Al₂O₃ // 14-я Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых. Сборник тезисов, материалы конференции. – С. 142.
8. Соловьев С.В. Спектральные особенности ТЛ в кристаллах анион-дефектного корунда Al₂O₃:C // Сборник тезисов докладов Иссык-Кульской международной летней школы по радиационной физике, новым материалам и информационных технологиям SCORPh-2008. – 2008. – С. 39.
9. Milman I.I., Litovchenko E.N., Moiseykin E.V., Solovlev S.V., Revkov I.G. Deep traps in α -Al₂O₃:C dosimetric crystals // 7th European Conference on Luminescent detectors and transformers of Ionizing Radiation “LUMDETR 2009”, Book of abstracts, – 2009. – P. 223.
10. Соловьев С.В., Моисейкин Е.В., Мильман И.И., Сюрдо А.И. Термо-фотоиндуцированное преобразование F и F⁺ - центров в анион-дефектных кристаллах α -Al₂O₃:C // Проблемы спектроскопии и спектрометрии. – Екатеринбург. УрФУ. – 2010. – Вып. 27. – С. 65-73.
11. Соловьев С.В., Моисейкин Е.В., Мильман И.И., Сюрдо А.И. Термо-фотоиндуцированное преобразование спектра ТЛ в дозиметрических кристаллах α -Al₂O₃:C // Научный журнал «Физика». Материалы международной конференции по радиационной физике, новым материалам и информационным технологиям SCORPh-2010. – 2010. – №1. – С. 184-190.
12. Соловьев С.В., Мильман И.И., Сюрдо А.И. Термо-фотоиндуцированное преобразование центров люминесценции в анион-дефектных α -Al₂O₃:C // Проблемы спектроскопии и спектрометрии. – Екатеринбург. УрФУ. – 2011. – Вып. 28. – С. 60-79.
13. Соловьев С.В., Мильман И.И., Сюрдо А.И. Глубокие ловушки в люминесценции аниондефектных кристаллов α -Al₂O₃:C // Проблемы спектроскопии и спектрометрии. – Екатеринбург. УрФУ. – 2011. – Вып. 28. – С. 130-146.
14. Соловьев С.В., Мильман И.И., Моисейкин Е.В., Сюрдо А.И. Термолучевая обработка твердотельного детектора ионизирующих излучений на основе оксида алюминия // Тезисы 8-й международной конференции «Ядерная и радиационная физика», – Алматы, Казахстан. – 2011. – С. 247-248.
15. Хамидулина И.С., Тесленко О.С., Соловьев С.В., Мильман И.И., Сюрдо А.И. Оптически стимулированная люминесценция кристаллов SrF₂:Eu //

Проблемы спектроскопии и спектрометрии. – Екатеринбург. УрФУ. – 2011. – Вып. 29. – С. 43-51.

16. Мильман И.И., Сюрдо А.И., Соловьев С.В., Абашев Р.М. Новые возможности повышения выхода оптически стимулированной люминесценции аниондефектного корунда // Проблемы спектроскопии и спектрометрии. – Екатеринбург. УрФУ. – 2011. – Вып. 29. – С. 63-72.

17. Soloviev S.V., Milman I.I., Surdo A.I. Calculation of kinetic parameters high-temperature TL peaks of anion-defective corundum // 3th International congress on radiation physics, high current electronics, and modification of materials, Abstract book, – 2012, – P. 138.

18. Litovchenko E.N., Soloviev S.V., Milman I.I., Moiseykin E.V., Surdo A.I. Influence of thermobeam processing on TL and OSL properties of the solid-state detector of ionizing radiation on the basis of anion-defective corundum // 3th International congress on radiation physics, high current electronics, and modification of materials, Abstract book, – 2012, – P. 127.

Патенты РФ

1. Патент на изобретение №2346296. Способ измерения дозы в твердотельных детекторах ионизирующих излучений на основе оксида алюминия, накопленной при повышенной температуре окружающей среды. /Мильман И.И., Моисейкин Е.В., Никифоров С.В., Ревков И.Г., Литовченко Е.Н., Соловьев С.В. / Заявка 16.07.2007, Опубликовано 10.02.2009.

2. Патент на изобретение №2399928. Способ возбуждения дозиметрического сигнала оптически стимулированной люминесценции детекторов ионизирующих излучений на основе оксида алюминия / Мильман И.И., Кружалов А.В., Моисейкин Е.В., Ревков И.Г., Литовченко Е.Н., Соловьев С.В., Сюрдо А.И. / Заявка 23.03.2009, Опубликовано 20.09.2010.

3. Патент на изобретение №2399831. Способ получения длительного послесвечения люминофоров оптических излучателей / Курмаев Э.З., Мильман И.И., Литовченко Е.Н., Соловьев С.В., Ревков И.Г., Федоренко В.В., Бунтов Е.А./ Заявка 17.03.2009, Опубликовано 20.09.2010.

4. Патент на изобретение №2393505. Способ определения распределения плотности потока электронов по его сечению / Курмаев Э.З., Мильман И.И., Литовченко Е.Н., Соловьев С.В., Ревков И.Г., Федоренко В.В., Бунтов Е.А. / Заявка 28, 05.05.2009, Опубликовано 27.06.2010.

5. Патент на изобретение № 2390798. Способ измерения дозиметрического термолюминесцентного сигнала, накопленного в твердотельном детекторе ионизирующих излучений на основе оксида алюминия / Курмаев Э.З., Мильман И.И., Литовченко Е.Н., Соловьев С.В., Ревков И.Г., Федоренко В.В. / Заявка 18.02.2009, Опубликовано 27.05.2010.