

На правах рукописи

КИСЕЛЕВА Мария Сергеевна

**КИНЕТИКА ПОСТРАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОПТИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛАХ С ПОДВИЖНЫМИ ДЕФЕКТАМИ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2018

Работа выполнена на кафедре экспериментальной физики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
ОГОРОДНИКОВ Игорь Николаевич

Официальные оппоненты: **ПОЛИСАДОВА Елена Федоровна**,
доктор физико-математических наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доцент отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий;
ПОДГОРНОВ Федор Валерьевич,
кандидат физико-математических наук, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, доцент кафедры физической электроники

Ведущая организация: ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск

Защита диссертации состоится «28» сентября 2018 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.285.02 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=279536>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ищенко Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие науки и техники привело к запросу на радиационно-стойкие оптические материалы, пригодные для работы в ультрафиолетовом (УФ) и вакуумном УФ (ВУФ) диапазонах спектра. К концу прошлого века усилиями многих научных коллективов была достигнута высокая степень изученности процессов дефектообразования и релаксации низкоэнергетических электронных возбуждений в кубических щелочно-галогидных кристаллах (ЩГК), которые ныне являются классическими модельными объектами физики конденсированного состояния. Впечатляющие успехи в изучении ЩГК стимулировали исследования практически-значимых систем с пониженной симметрией. Одной из таких систем является класс радиационно-стойких оптических материалов на основе низкосимметричных широкозонных оксидных диэлектриков, сформировавшийся к началу 80-х годов прошлого века благодаря бурному развитию твердотельной коротковолновой лазерной техники и интегральной оптики. Фундаментальной особенностью этих материалов является наличие т.н. *анионных групп* с сильными ковалентными связями внутри групп и сравнительно слабыми ионными связями между анионными группами и катионной подрешеткой. Данная особенность оказывает существенное влияние на процессы радиационного дефектообразования, электронную структуру, механизмы релаксации низкоэнергетических электронных возбуждений. Особую остроту данное влияние приобретает в случае т.н. *катионов малого радиуса*, которые становятся подвижными вблизи комнатной температуры. Важнейшими представителями данного класса оптических материалов являются широкозонные кристаллы дигидрофосфатов калия KH_2PO_4 (KDP) и аммония $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ADP), боратов лития - тетраборат лития $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (LTB), триборат лития LiB_3O_5 (LBO) и двойной ортоборат лития-гадолиния $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ (LGBO).

Степень разработанности проблемы исследования. Несмотря на огромный интерес к данным материалам и очевидную важность рассматриваемого явления, до сих пор не проводилось систематического изучения широкозонных оптических материалов с подвижными катионами малого радиуса с точки зрения влияния процессов формирования и эволюции короткоживущих радиационных дефектов на релаксацию низкоэнергетических электронных возбуждений. Имеющиеся экспериментальные работы, как правило, фрагментарны, касаются одного какого-то объекта, а теоретические представления в интерпретации экспериментальных данных ограничиваются рассмот-

рением простых асимптотических зависимостей типа закона Беккереля. Со всей очевидностью, учет влияния подвижных катионов малого радиуса на динамику низкоэнергетических электронных возбуждений и процессы радиационного дефектообразования в широкозонных оптических материалах требует консолидированного использования экспериментальных методов времяразрешенной спектроскопии с наносекундным временным разрешением и более адекватных математических представлений.

Целью настоящей работы является комплексное исследование кинетики пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов (10 нс -10 с) в широкозонных оптических материалах с подвижными катионами малого радиуса (ADP, KDP, LBO, LTB, LGBO) путем консолидированного применения техники времяразрешенной спектроскопии с наносекундным временным разрешением и методов вычислительной физики.

Достижение поставленной цели потребовало выполнения комплекса экспериментальных и расчетных исследований и решения следующих **задач**:

1. Разработать и создать программный комплекс для моделирования пострадиационных процессов в широкозонных оптических материалах с подвижными катионами малого радиуса, позволяющий в широком диапазоне времени затухания осуществлять расчет важнейших функциональных зависимостей для описания кинетики пострадиационных процессов.

2. На примере кристаллов дигидрофосфатов калия (KDP) и аммония (ADP), применяя экспериментальные (импульсная времяразрешенная спектроскопия) и расчетные (созданный программный комплекс) методы, исследовать кинетику пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов катионной подрешетки в нелегированных оптических материалах с $3D$ -подвижными катионами малого радиуса (протоны).

3. На примере кристаллов тетрабората (LTB) и трибората (LBO) лития, применяя экспериментальные (импульсная времяразрешенная спектроскопия) и расчетные (созданный программный комплекс) методы, исследовать кинетику пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов в нелегированных оптических материалах с $1D$ -подвижными катионами малого радиуса (ионы лития).

4. На примере кристаллов двойного ортобората лития-гадолиния, применяя экспериментальные (импульсная времяразрешенная спектроскопия) и расчетные (созданный программный комплекс) методы, исследовать кинетику пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов в нелегированных (LGBO) и легированных (LGBO:Ce) оптических материалах с $1D$ -подвижными катионами малого радиуса (ионы лития).

5. Изучить влияние пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов на кинетику излучательного распада низкоэнергетических электронных возбуждений в легированных (LGBO:Ce) оптических материалах с $1D$ -подвижными катионами малого радиуса (ионы лития), применяя экспериментальные (импульсная времяразрешенная спектроскопия) и расчетные (созданный программный комплекс) методы.

Объектами исследования являются практически значимые широкозонные оптические кристаллы с подвижными катионами малого радиуса ADP, KDP, LBO, LTB, LGBO для работы в УФ – ВУФ диапазонах спектра.

Научная новизна состоит в консолидированном применении техники времяразрешенной спектроскопии с наносекундным временным разрешением совместно с методами вычислительной физики для комплексного исследования кинетики пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов (10 нс -10 с) в широкозонных оптических материалах с подвижными катионами малого радиуса (ADP, KDP, LBO, LTB, LGBO), что позволило впервые получить следующие научные результаты:

1. Разработана и реализована в виде программного комплекса математическая модель для описания пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов в широкозонных оптических материалах с подвижными катионами малого радиуса, особенностью которой является использование уравнения Смолуховского для корреляционной функции разнотипных дефектов $Y(r, t)$, учитывающего диффузионный процесс в системе подвижных реагентов и туннельный перенос электрона между антиморфными дефектами этой системы.

2. В широкой области времен затухания 10 нс -100 с исследована кинетика пострадиационных процессов релаксации $3D$ -подвижных радиационных дефектов катионной подрешетки нелегированных кристаллов с водородными связями ADP и KDP.

Установлено, что она обусловлена диффузионным процессом в системе подвижных катионов и туннельным переносом электрона между антиморфными дефектами водородной подрешетки. В рамках проведенного исследования был выявлен и получил объяснение плотностной эффект - зависимость кинетики от плотности энергии импульса возбуждения.

3. Установлено, что кинетика пострадиационных процессов релаксации $1D$ -подвижных радиационных дефектов катионной подрешетки нелегированных кристаллов боратов лития LTB и LBO в широкой области времен затухания 100 нс -1 с обусловлена диффузионным процессом в системе подвижных катионов лития и туннельным переносом электрона между антиморфными дефектами катионной подрешетки.

4. Для кристаллов двойного ортобората лития-гадолиния установлено, что кинетика пострадиационных процессов релаксации $1D$ -подвижных радиационных дефектов катионной подрешетки нелегированных (LGBO) и легированных (LGBO:Ce) кристаллов в широкой области времен затухания 100 нс -1 с обусловлена диффузионным процессом в системе подвижных катионов лития и туннельным переносом электрона между антиморфными дефектами подрешетки катионов лития. Выявлена, получила объяснение и была параметризована температурная зависимость кинетики пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов.

5. На основании полученных экспериментальных (импульсная времяразрешенная спектроскопия) и расчетных (созданный программный комплекс) данных установлено и объяснено влияние пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов на кинетику излучательного распада низкоэнергетических электронных возбуждений в легированных (LGBO:Ce) оптических материалах с $1D$ -подвижными катионами малого радиуса (ионы лития).

Теоретическая и практическая значимость работы. Экспериментальные и расчетные результаты, полученные при изучении широкозонных оптических материалов с подвижными катионами малого радиуса (ADP, KDP, LBO, LTB, LGBO), представляют теоретическую и практическую значимость.

Теоретическая значимость полученных результатов для физики конденсированного состояния определяется тем, что для широкозонных оптических материалов с подвижными катионами малого радиуса сформулированы модельные представления, позволяющие с единых позиций качественно и количественно описать кинетику по-

страдиационных процессов релаксации радиационных дефектов (10 нс -10 с) после импульсного радиационного воздействия наносекундной длительности.

Практическая значимость работы обусловлена тем, что для широкозонных оптических материалов с подвижными катионами малого радиуса (ADP, KDP, LBO, LTB, LGBO) определены функциональные зависимости и получены численные значения корреляционных функций разнотипных дефектов $Y(r, t)$, нестационарных констант скоростей реакций $K(t)$, кривых кинетики пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов $n(t)/n_0$; Для каждого объекта исследования выполнена параметризация функциональных зависимостей и получены значения параметров наилучшей аппроксимации: половина радиуса бора a_B , предэкспоненциальный множитель W_0 для функции вероятности междефектного туннельного переноса электрона, параметр D , имеющий смысл коэффициента взаимной диффузии разнотипных дефектов. Полученные функциональные зависимости и наборы параметров позволяют для каждого объекта исследования осуществлять расчеты кинетики пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов в широкой области времен затухания 10 нс -10 с.

Разработан и реализован программный комплекс «КМТР-1», защищенный свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011616814. Комплекс позволяет моделировать кинетику пострадиационных процессов в рамках модели туннельного переноса электрона в условиях подвижности одного из партнеров рекомбинационного процесса. Круг объектов для применения комплекса «КМТР-1» не ограничивается упомянутыми в настоящей работе кристаллами широкозонных оксидных диэлектриков, он может быть расширен на другие оптические материалы.

Сопоставление результатов моделирования и экспериментальных данных позволяет сделать выводы о механизмах и количественных характеристиках протекающих в кристаллах пострадиационных процессов, которые представляют значительный интерес, как с фундаментальной точки зрения, так и с практической. С практической точки зрения, полученные сведения могут быть использованные для прогнозирования и управления свойствами оптических материалов в условиях воздействия импульсного ионизирующего излучения, а также оптимизации их радиационно-оптических характеристик.

Защищаемые положения:

1. Кинетика пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов $n(t)/n_0$ широкозонных оптических материалов с подвижными катионами малого радиуса – дигидрофосфаты калия и аммония (ADP, KDP), бораты лития (LBO, LTB, LGBO) - в широкой временной области 10 нс -10 с описывается моделью, ключевыми моментами которой являются: уравнение Смолуховского для корреляционной функции разнотипных дефектов, нестационарная константа скорости реакции $K(t)$, соответствующая переходной кинетике бимолекулярной реакции $A + B \rightarrow 0$, и туннельный перенос электрона между антиморфными дефектами в условиях термостимулированной подвижности одного из партнеров туннельного рекомбинационного процесса.

2. В системе «замороженных» дефектов (отсутствие подвижности при низких температурах) кинетика пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов в широкой временной области 10 нс -10 с описывается единой функциональной зависимостью (теоретической кривой) в системе безразмерных параметров. В этой температурной области все различия в форме наблюдаемых кинетических кривых объясняются тем, что реальные кинетические кривые проецируются на различные участки одной и той же теоретической кривой в системе безразмерных параметров.

3. В системе подвижных дефектов кинетика пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов в широкой временной области 10 нс -10 с характеризуется двумя стадиями. Начальная стадия не зависит от температуры, контролируется процессом туннельного переноса электрона между антиморфными дефектами и подчиняется функциональной зависимости кинетики туннельной рекомбинации в системе неподвижных дефектов. Конечная стадия кинетики контролируется диффузионным процессом в системе подвижных дефектов и асимптотически стремится к гиперболической зависимости первого порядка. Термостимулированное смещение конечной стадии в область меньших времен затухания обусловлено температурной зависимостью коэффициента взаимной диффузии разнотипных дефектов.

4. Наблюдаемый в кристаллах ADP и KDP плотностной эффект в кинетике пострадиационных процессов релаксации системы 3D-подвижных дефектов («укорочение» кинетики с повышением плотности импульса возбуждения) обусловлен обратной зависимостью постоянной времени затухания $n(t)/n_0$ от плотности импульса возбуждения.

5. Наблюдаемое в кристаллах LGBO:Ce влияние пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов в системе $1D$ -подвижных катионами малого радиуса (ионы лития) на кинетику излучательного распада низкоэнергетических электронных возбуждений, в рамках выдвинутой модели объяснено (качественно и количественно) туннельным переносом электрона между радиационными дефектами и примесными Ce(IV) центрами, приводящим к формированию короткоживущих Ce(III) центров в возбужденном состоянии.

Личный вклад автора. В диссертационной работе обобщены материалы исследований, которые выполнены лично автором или проведены совместно с научным руководителем при непосредственном участии автора. Постановка задач и определение направлений и методов исследования были проведены совместно с научным руководителем. Разработка математической модели и программного комплекса были выполнены автором при методической поддержке научного руководителя. Экспериментальные данные с использованием методов импульсной абсорбционной и люминесцентной спектроскопии были получены автором в Томском политехническом университете при методической поддержке д.ф.-м.н. В.Ю.Яковлева. Обработка, анализ и интерпретация экспериментальных и расчетных данных, подготовка научных публикаций, формулировка выводов и защищаемых положений по диссертационной работе принадлежат лично автору.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международных конференциях по радиационной физике и химии неорганических материалов RPC-17 (Томск, 2016) и RPC-16 (Томск, 2014), XII Всероссийской молодежной школе – семинаре по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Екатеринбург, 2011), второй Международной школе по физике и химии наноструктурных материалов PCnano-2011 (Екатеринбург, 2011), XVII Всероссийской конференции студентов – физиков и молодых ученых (Екатеринбург, 2011).

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 19 научных работах, включая 9 статей в ведущих российских и зарубежных рецензируемых научных журналах из списка ВАК, Scopus, Web of Science; 1 свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 146 страниц, содержит 6 таблиц, 39 рисунков и список использованных источников, состоящий из 118 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В разделе «**Введение**» приведено обоснование актуальности темы, сформулированы цели и задачи исследования, определены научная новизна полученных результатов и практическая значимость, представлены защищаемые положения и апробация работы.

Первая глава «Особенности оптических свойств и пострadiaционных процессов в кристаллах с подвижными катионами (аналитический обзор)» посвящена краткому обзору литературных данных по особенностям кристаллографической структуры, физико-химическим свойствам, механизмам дефектообразования и релаксации наведенной оптической плотности.

У всех изучаемых кристаллов наблюдается сходная структура: можно выделить анионные группы, состоящие из фосфатных или борокислородных каркасов с прочными ковалентными связями между атомами, и катионы атомов малого радиуса (водорода или лития), которые слабо связаны ионными связями между собой и анионными группами. Указанные особенности анионных групп влияют на электронную структуру кристалла и обеспечивают высокие показатели радиационно-оптической устойчивости. Вместе с тем, подвижная катионная подрешетка обуславливает специфику радиационного дефектообразования и оказывает существенное влияние на динамику электронных возбуждений в кристалле.

При возбуждении пучком электронов ($E_e=200$ кэВ) наносекундной длительности в кристалле формируется полоса короткоживущего оптического поглощения. Ранее было установлено, что кинетика затухания КОП в широкой временной области контролируется процессом туннельного переноса электрона между электронными и дырочными центрами.

Во **второй главе** «Объекты и методы исследования» приведены сведения об образцах изучаемых кристаллов, аппаратуре и методиках (экспериментальных и теоретических) их изучения. Исследование оптических кристаллов боратов и дигидрофос-

фатов с помощью методов импульсной люминесцентной и оптической абсорбционной спектроскопии с наносекундным временным разрешением при возбуждении электронным пучком выполнено нами в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (г. Томск) при методической поддержке профессора В.Ю. Яковлева.

Нами была разработана теоретическая модель для описания пострадиационных процессов в широкозонных оптических материалах с подвижными катионами малого радиуса. Ключевым моментом модели является использование уравнения Смолуховского (1) для корреляционной функции $Y(r,t)$ разнотипных дефектов, которое позволяет одновременно учитывать как процесс туннельного переноса электрона между антиморфными дефектами, так и процесс диффузии, изменяющий взаимное расстояние между радиационными дефектами.

$$\frac{\partial Y(r,t)}{\partial t} = D \nabla \left[\nabla Y(r,t) + \frac{1}{k_B T} \nabla U(r) \right] - W(r) Y(r,t), \quad (1)$$

где $D = D_0 \exp(-E_a / k_B T)$ - коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$, E_a - энергия активации, эВ, $U(r) = -\alpha / r^3$ - потенциал упругого взаимодействия дефектов, зависящий от расстояния между ними, где α - это константа упругого взаимодействия, эВ м^3 , T - температура, К. $W(r) = W_0 \exp(-r / a_B)$ - вероятность гибели дефектов при рекомбинации, a_B - это половина радиуса Бора волновой функции электронного центра и W_0 - безразмерная константа, r - расстояние между дефектами, м, k_B - постоянная Больцмана, эВ/К.

Функцию константы скорости реакции можно записать в следующем виде:

$$K(t) = \int_V W(r) Y(r,t) dV. \quad (2)$$

В данной работе мы пользуемся линейным приближением для описания динамики процессов, т.е. рассматриваем только макроскопические концентрации дефектов n_A и n_B и их парные корреляционные функции $Y(r,t)$. Линейное приближение позволяет независимо решать уравнения для функции скорости реакции и для концентраций дефектов.

Бимолекулярная стадия взаимодействия дефектов, т.е. рекомбинация между различными парами дефектов описывается с помощью следующего кинетического уравнения (3) для макроскопических концентраций:

$$\frac{dn_A}{dt} = -K(t) \times n_A(t) \times n_B(t). \quad (3)$$

При равных концентрациях дефектов $n(t) = n_A(t) = n_B(t)$ уравнение (3) можно записать в следующем виде:

$$n(t) = n_0 \left[1 + n_0 \int_0^t K(t) dt \right]^{-1}, \quad (4)$$

где $n(0) = n_0$.

Для практической реализации разработанной математической модели был создан программный комплекс "КМТР-1", на который было получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [10]. В рамках предложенной математической модели программный комплекс позволяет осуществлять расчет важнейших функциональных зависимостей для описания пострадиационных процессов: корреляционной функции разнотипных дефектов $Y(r,t)$, нестационарной константы скорости реакции $K(t)$ и кинетики изменения концентрации радиационных дефектов $n(t)$ на довольно широком временном диапазоне (от 10^{-9} до 100 с). В комплексе предусмотрена возможность параметризации модели путем сравнения расчетных зависимостей $n(t)/n_0$ с экспериментальными данными по кинетике затухания КОП: $D(t)/D_0$ и осуществления процедуры оптимизации стартового набора параметров для достижения наилучшей аппроксимации с использованием метода Левенберга-Марквардта.

В **третьей главе** «Кристаллы с водородными связями ADP и KDP» представлены результаты экспериментального исследования оптических кристаллов дигидрофосфатов калия KDP (KH_2PO_4) и аммония ADP ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), полученные методом импульсной абсорбционной спектроскопии при возбуждении электронным пучком наносекундной длительности. Для обоих типов кристаллов (ADP и KDP) приведены экспериментальные данные по спектрам и кинетике затухания короткоживущего оптического поглощения (КОП), полученные при различных уровнях плотности импульсного возбуждения. Для интерпретации экспериментальных данных было выполнено численное моделирование кинетики затухания короткоживущего оптического поглощения, обусловленного радиационными дефектами водородной подрешетки в виде антиморфных пар дефектов {междоузельный атом водорода – вакансия водорода}.

При импульсном радиационном воздействии на кристаллы ADP и KDP, кинетика затухания КОП в широком временном диапазоне контролируется процессом туннельного переноса электрона между электронными (междоузельный атом водорода) и дырочными центрами (А- и В- радикалы). Результаты проведенного исследования кинетики пострадиационных процессов в этих кристаллах полностью согласуются с ранее сделанным выводом о том, что короткоживущее оптическое поглощение кристаллов дигидрофосфатов обусловлено оптическими переходами между состояниями валентной зоны и дырочными центрами на основе дефектов водородной подрешетки.

С помощью разработанного нами программного комплекса "КМТР-1" было выполнено численное моделирование кинетики пострадиационных процессов для кристаллов ADP и KDP, результаты моделирования были сопоставлены с экспериментальными данными по кинетике затухания КОП (рис. 1) и проведена их параметризация. Выбранная модель туннельного переноса электрона в условиях диффузионной подвижности дефектов вполне адекватно описывает экспериментальные данные.

Временной диапазон кинетики затухания КОП можно разделить на два характерных участка. Начальный участок контролируется процессом туннельного переноса электрона, он похож на случай туннельной рекомбинации в системе неподвижных дефектов. Конечный участок кинетики затухания контролируется, главным образом, диффузионным процессом, который характеризуется быстрым экспоненциальным спадом интенсивности. При повышении температуры наблюдается термостимулированное «укорочение» кинетики, при этом энергия активации соответствует диффузионному процессу.

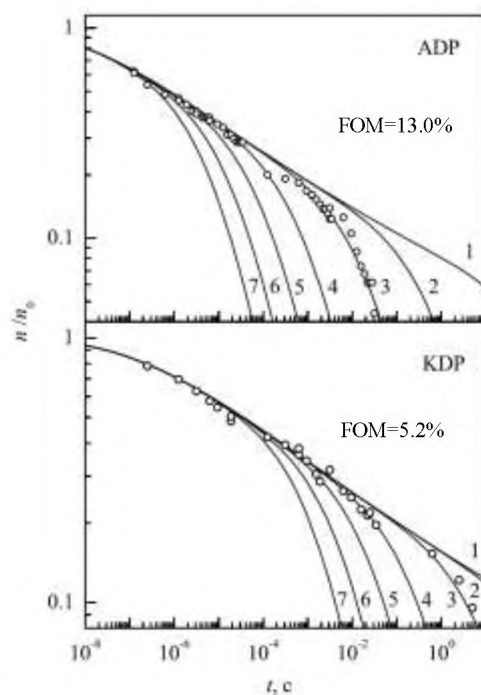


Рисунок 1 – Зависимость n/n_0 в интервале T от 200 – (1) до 500 К – (7). Светлыми кружками показаны экспериментальные по кинетике затухания КОП

Сложное поведение константы скорости реакции $K(t)$ во всем временном диапа-

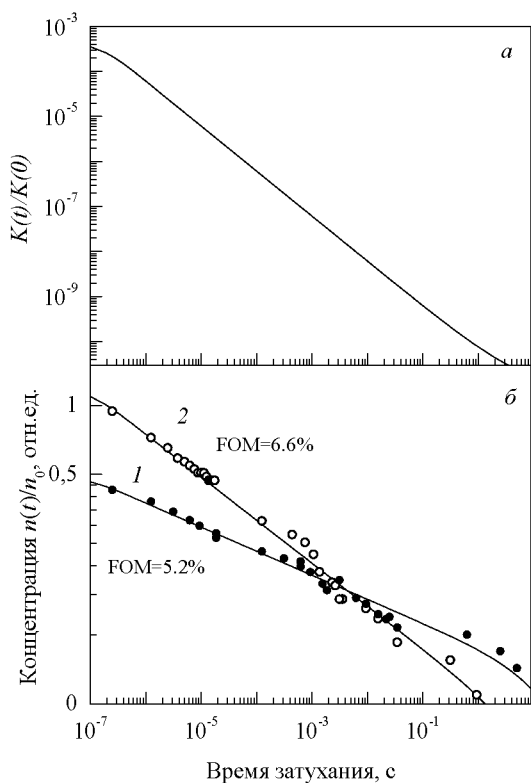


Рисунок 2 – Зависимости $K(t)/K(0)$ – (а) и n/n_0 – (б) Кружками показаны экспериментальные данные по кинетике затухания КОП KDP при одинарной (1) и удвоенной (2) плотности энергии импульса возбуждения длительностью 10 нс

зоне свидетельствует о протекании нестационарной диффузионно-контролируемой туннельной перезарядки дефектов. Кинетика при этом является переходной и простые асимптотические формулы (например, закон Беккереля) не могут применяться для описания такой кинетики.

Увеличение мощности импульса возбуждения приводит к увеличению отрицательного наклона кинетики затухания КОП в двойных логарифмических координатах (рис. 2), что обусловлено возрастанием начальной концентрации дефектов n_0 . Функция скорости реакции $K(t)$ при этом остается неизменной.

При повышении температуры происходит возрастание начальной кон-

центрации дефектов n_0 , создаваемых единичным импульсом возбуждения постоянной плотности энергии (мощности). Температурная зависимость отрицательного наклона начального участка кинетики затухания КОП в двойных логарифмических координатах характеризуется энергией активации, соответствующей ключевому процессу, контролирующему накопление дефектов во время действия возбуждающего импульса. При температуре выше комнатной в кристаллах с подвижными катионами таким процессом обычно является диффузия. Поэтому экспериментальная энергия активации, определенная по температурной зависимости начального участка кинетики затухания соответствует таковой для диффузионного процесса.

В четвертой главе «Оптические кристаллы боратов лития LTB и LBO» представлены результаты комплексного исследования кристаллов LTB и LBO. Экспериментальная часть исследования выполнена методом импульсной абсорбционной спек-

троскопии с наносекундным временным разрешением при возбуждении наносекундным (10 нс) пучком 200 кэВ-электронов, получены экспериментальные данные по спектрам (видимый-УФ диапазоны) и кинетике затухания (10 нс-100 с) КОП кристаллов LTB и LBO. Расчетная часть исследования была выполнена с привлечением теории диффузионно-контролируемых реакций с учетом туннельного переноса электрона между подвижными антиморфными дефектами литиевой подрешетки. При сопоставлении экспериментальных данных и результатов моделирования выявлено, что решающую роль в формировании кинетики затухания КОП в кристаллах боратов лития играет процесс туннельного переноса электрона (туннельной рекомбинации) между антиморфными дефектами литиевой подрешетки в условиях термостимулированной подвижности радиационных дефектов.

При импульсном радиационном воздействии в кристаллах LTB и LBO формируются центры двух видов: дырочные центры поляронного типа с обобщенным названием O^- -центр (дырка, локализованная на $2p$ -орбитали кислорода в окрестности вакансии лития) и электронные Li^0 -центры в виде междоузельных атомов лития. Появление КОП в данном случае обусловлено оптическими переходами между состояниями валентной зоны и локальным уровнем дырочного центра.

Особенности кинетики релаксации наведенной оптической плотности в кристаллах LTB и LBO для широкой временной области $10^{-7} - 1$ с (рис. 3) вполне адекватно описываются моделью туннельного переноса электрона между электронными и дырочными центрами в условиях термостимулированной подвижности одного из партнеров рекомбинационного процесса.

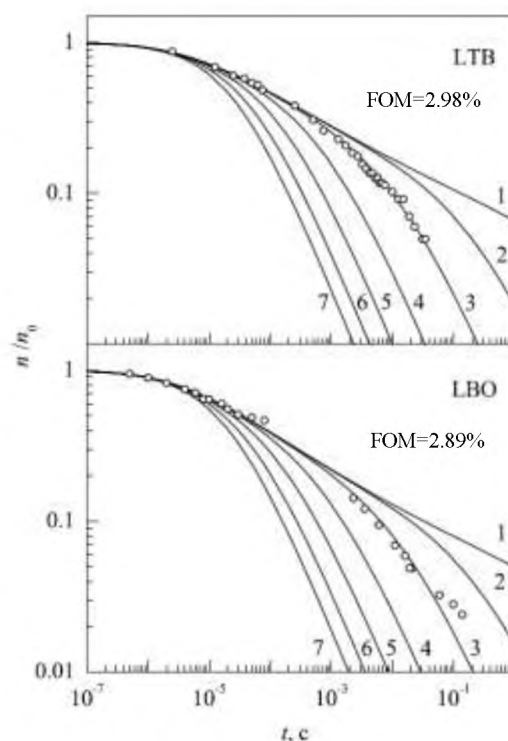


Рисунок 3 – Зависимость n/n_0 в интервале T от 200 – (1) до 500 К – (7). Светлыми кружками показаны экспериментальные по кинетике затухания КОП

В пятой главе «Оптические кристаллы ортобората литий-гадолиния LGBO» для

оптических кристаллов LGBO и LGBO:Ce: методом импульсной абсорбционной и люминесцентной спектроскопии с наносекундным временным разрешением проведено исследование спектров и кинетики затухания КОП и ИКЛ; выполнено математическое моделирование кинетики затухания КОП и ИКЛ с учетом туннельного переноса электрона между аморфными дефектами катионной (Li) подрешетки в условиях термостимулированной подвижности одного из партнеров туннельной рекомбинации.

При импульсном радиационном воздействии в LGBO формируются дырочные центры поляронного типа (O^- -центр - дырка, локализована на $2p$ -орбитали кислорода в окрестности вакансии лития) и электронные (Li^0 -центр - междоузельный атом лития). Оптические переходы между состояниями валентной зоны и локальным

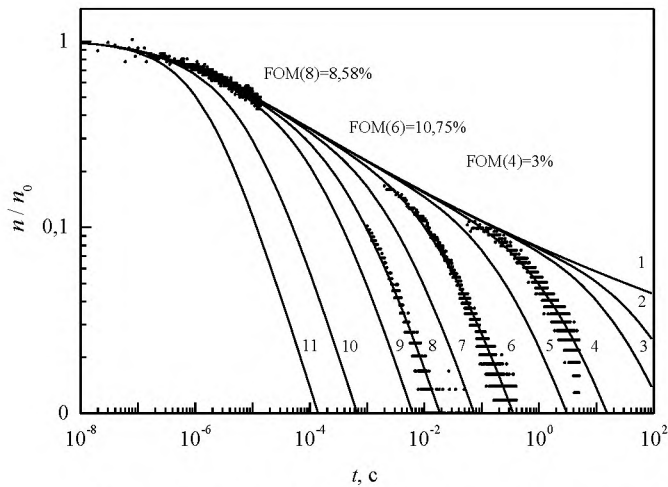


Рисунок 4 – Зависимость n/n_0 в интервале T от 200 – (1) до 500 К – (11). Точками показаны экспериментальные по кинетике затухания КОП



Рисунок 5 – Модель рекомбинационных процессов с участием примесных и собственных дефектов

уровнем дырочного O^- центра обуславливают наблюдаемое КОП.

Особенности кинетики релаксации наведенной оптической плотности в неактивированных кристаллах LGBO для широкой временной области $10^{-7} - 1$ с (рис. 4) вполне адекватно описываются моделью туннельного переноса электрона между электронными и дырочными центрами в условиях термостимулированной подвижности одного из партнеров туннельного рекомбинационного процесса.

Методом математического моделирования проведен анализ экспериментальных данных по кинетике затухания КОП и ИКЛ монокристаллических и кристалловолоконных образцов LGBO:Ce, получены параметры наилучшей аппроксимации, объяс-

нено сходство и различия. Предложена математическая модель и дано теоретическое обоснование альтернативного механизма возбуждения ИКЛ в LGBO:Ce (рис. 5). Воздействие электронного пучка на кристалл LGBO:Ce создает короткоживущие дефекты – электронные центры (Li^0) в окрестности ионов Ce^{4+} . Туннельный перенос электрона между центрами Ce^{4+} и Li^0 приводит к формированию короткоживущего центра Ce^{3+} в возбужденном состоянии. Излучательная релаксация возбужденного иона церия вносит дополнительный вклад в d-f люминесценцию примесных ионов Ce^{3+} .

В данной главе приведено сравнение и обобщение результатов моделирования кинетики туннельного переноса в исследуемых оптических кристаллах с подвижными дефектами (ADP, KDP, LBO, LTB, LGBO). При комнатной температуре у всех перечисленных кристаллов наблюдается термостимулированная подвижность дефектов. В кристаллах ADP и KDP подвижность наблюдается у междоузельных атомов водорода H^0 , а в боратах лития – у междоузельных атомов лития Li^0 . Однако ниже определенной температуры (для каждого вида кристаллов она своя) дефекты находятся в «замороженном» состоянии, т.е. мы можем говорить о системе неподвижных дефектов. Характер кинетики в системе подвижных и неподвижных дефектов будет существенно отличаться.

Для дальнейших обсуждений введем безразмерные величины:

$$t' = W_0 t, \quad x = r/a_B, \quad D' = D/(W_0 a_B^2). \quad (5)$$

Рассмотрим систему «замороженных» дефектов. При отсутствии диффузии кинетическое уравнение (1) приобретает простой вид:

$$\frac{\partial Y(x, t')}{\partial t'} = - \exp(-x) Y(x, t'), \quad (6)$$

которое при хаотическом начальном распределении $Y(x, 0) = I$ будет иметь простое аналитическое решение. Зная выражение для $Y(x, t')$, можно вычислить $K(t')$ и $n(t')$.

На рис. 6 представлено семейство кривых $Y(x, t')$, построенных в различные моменты времени t' . Видно, что фронт туннельной рекомбинации перемещается со временем синхронно без искажений.

Скорость реакции в системе неподвижных дефектов можно записать следующим образом:

$$K(t') = \frac{K(0)}{2} \int_0^\infty x^2 \exp(-x) Y(x, t') dx, \quad (7)$$

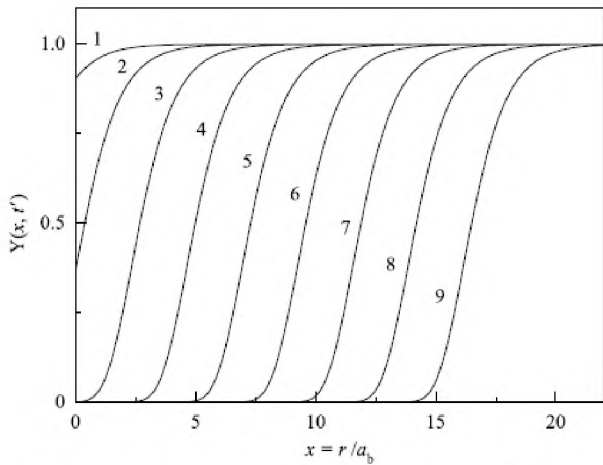


Рисунок 6 – Корреляционные функции $Y(r, t')$ разнотипных дефектов для системы неподвижных дефектов в моменты времени t' от 0.1 (1) до 10^7 (9)

$$\frac{n(t')}{n_0} = \left(1 + 2 p_0 \int_0^{t'} \frac{K(t')}{K(0)} dt' \right)^{-1}, \quad (8)$$

где n_0 – начальная концентрация дефектов, а $p_0 = 4 \pi a_b^3 n_0$.

В работе были рассчитаны значения $t_0 = W_0^{-1}$, $K(0)$ и p_0 , соответствующие экспериментальным данным по кинетике затухания КОП для всех исследованных кристаллов.

При сопоставлении рис. 7, б и полученных расчетных данных можно сделать два важных вывода. Во-первых, по параметру p_0 полученные экспериментально кинетики затухания $n(t')$ в системе неподвижных дефектов могут быть сопоставлены с теоретическими кривыми на рис. 7, б: ADP, KDP – кривая (2); LTB, LBO – (4); LGBO – (3).

Во-вторых, величина t_0 для ADP и KDP почти на два порядка меньше длительности возбуждающего импульса τ_e , поэтому кинетика затухания КОП для данных кристаллов будет соответствовать случаю $t' \gg 1$ во всем измеренном диапазоне времен затухания

где $K(0) = 8 \pi a_b^3 W_0$. Предполагается, что при импульсном радиационном воздействии в кристалле создаются френкелевские пары, что подразумевает равенство концентраций создаваемых антиморфных дефектов, в этом случае уравнение (4) может быть записано следующим образом в безразмерном виде

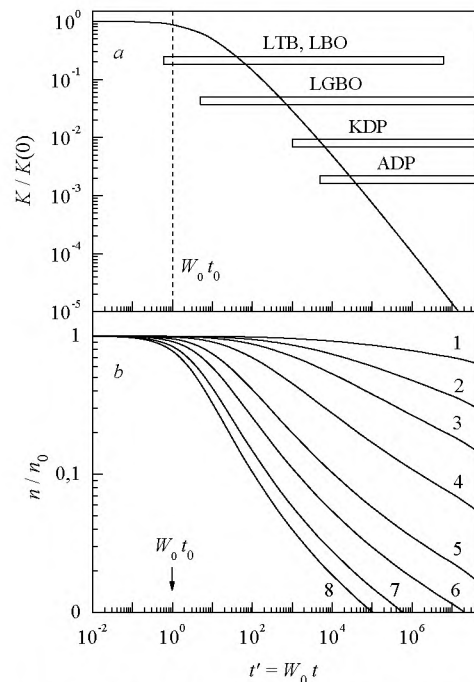


Рисунок 7 – $K(t')/K(0)$ – (а) $n(t')/n_0$ – (б) при значениях параметра $10^3 p_0$: 0.25 – (1), 1.0 – (2), 2.5 – (3), 7.5 – (4), 25 – (5), 50 – (6), 100 – (7) и 150 – (8). Горизонтальные полосы – временные диапазоны, в которых измерены кинетики затухания КОП кристаллов

хания. Для кристаллов LTV и LBO величина t_0 сопоставима с τ_e , поэтому будет наблюдаться переход от случая $t' \ll 1$ к $t' \gg 1$. Значение t_0 для LGBO сопоставимо с τ_e , поэтому левая граница измеренного диапазона времен затухания в этом кристалле соответствует случаю $t' > 1$, рис. 7.

В системе подвижных дефектов уравнение Смолуховского (1) в безразмерных координатах будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial Y(x, t')}{\partial t'} = D' \Delta Y(x, t') - \exp(-x) Y(x, t'). \quad (9)$$

Результаты численного решения уравнения (9) при различных значениях параметра D' приведены на рис. 8. При малых значениях D' вид корреляционных функций (рис. 8, а) соответствует таковому в системе неподвижных дефектов (рис. 6). С увеличением параметра D' (1.6×10^{-7}) происходит частичное искажение фронта рекомбинации (рис. 8, б): при малых временах затухания доминирует туннельный процесс (кривые 4-10), а при больших - диффузионно-

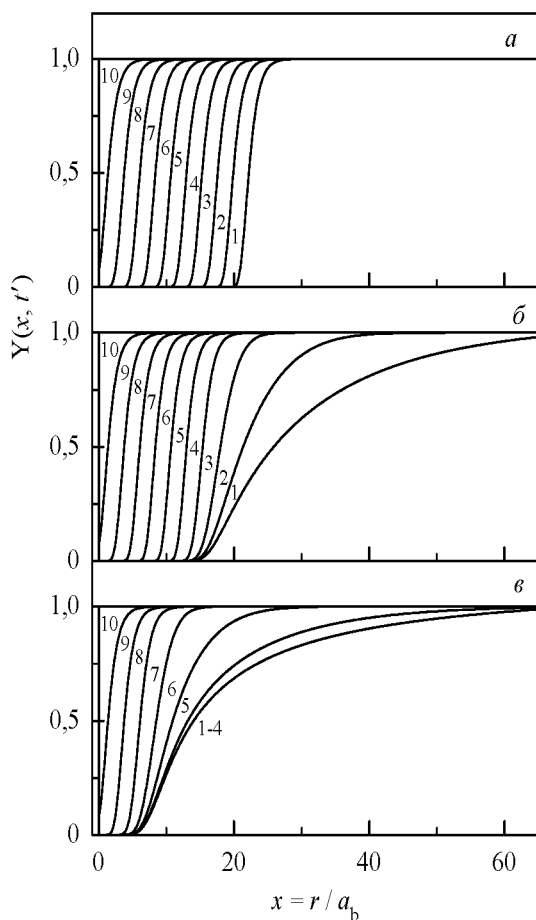


Рисунок 8 – Корреляционные функции $Y(x, t')$ в моменты t' от 3×10^9 – (1) до 3×10^{-10} – (10): при $D' = 2.6 \times 10^{-14}$ – (а), 1.6×10^{-7} – (б) и 1.3×10^{-3} – (в).

контролируемая реакция (кривые 1-3). С увеличением параметра D' (1.6×10^{-7}) происходит частичное искажение фронта рекомбинации (рис. 8, б): при малых временах затухания доминирует туннельный процесс (кривые 4-10), а при больших - диффузионно-

контролируемая реакция (кривые 1-3). В системе подвижных дефектов относительный вклад туннельного механизма рекомбинации и диффузионно-

контролируемой реакции можно оценить с помощью параметра $\eta = \frac{\exp(-r_0/a_b)}{D'}$. В случае $\eta \gg 1$ наблюдается сильная туннельная

перезарядка. С увеличением коэффициента диффузии параметр η будет уменьшаться, что будет свидетельствовать о преобладании

диффузионного процесса. Из расчетов величины η для $T=400$ К и $r_0 = 0.5$ нм, можно сделать вывод, что во всех рассмотренных

кристаллах даже при довольно высокой температуре наблюдается сильная туннельная перезарядка.

Чтобы охарактеризовать процессы в данных условиях, можно ввести понятие характерного радиуса R_s сильной ТП $R_s = -a_B \ln(D')$. Характерные значения радиуса сильной ТП R_s для изучаемых кристаллов лежат в диапазоне от 12.9 до 21.9 нм

При увеличении коэффициента диффузии происходит полная компенсация спада скорости реакции на исследуемом временном диапазоне: $K(t')$ выходит на стационарное значение скорости реакции K_0^* , что свидетельствует о завершении переходной кинетики:

$$K_0^* = 4\pi DR_s = -\frac{1}{2}K(0)D' \ln D' \quad (9)$$

На рис. 9 приведены зависимости K_0^* и R_s от значения коэффициента D' , а также указаны диапазоны данного параметра в диапазоне температур от 200 до 500 К для всех рассматриваемых кристаллов. Анализируя рис. 9 можно заметить, что при изменении температуры величина K_0^* для изучаемых кристаллов возрастает на 4-12 порядков, в то время как характерный радиус уменьшается на порядок величины. Можно сделать вывод, что увеличение подвижности дефектов приводит к более быстрому завершению переходных кинетических процессов и переходу стационарной кинетике рекомбинации дефектов.

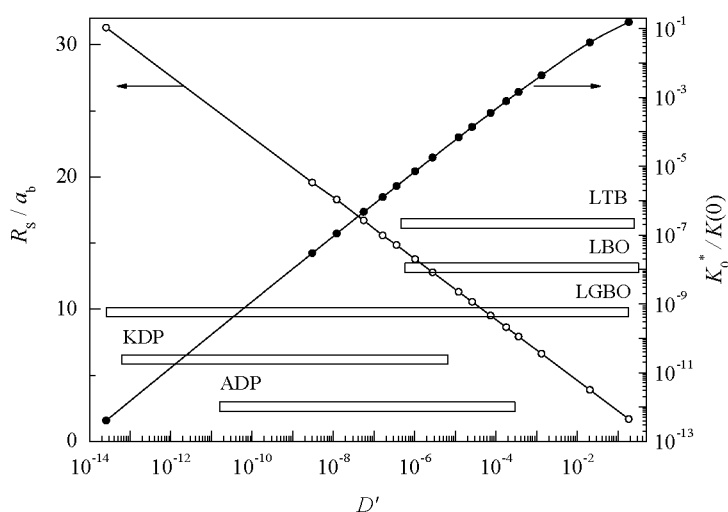


Рисунок 9 – Зависимости стационарного значения скорости реакции $K_0^*/K(0)$ и R_s/a_B от D' . Светлыми горизонтальными полосами показаны диапазоны D' в интервале температур 200–500 К

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

Путем консолидированного применения техники оптической спектроскопии с наносекундным временным разрешением и методов вычислительной физики выполнено комплексное исследование кинетики (10 нс -10 с) пострадиационных процессов релаксации радиационно-индуцированных дефектов в широкозонных оптических материалах с подвижными катионами малого радиуса (ADP, KDP, LBO, LTB, LGBO).

Полученные экспериментальные данные и результаты расчетов позволяют сформулировать следующие основные выводы.

1. Сформулированы модельные представления, позволяющие с единых позиций качественно и количественно описать кинетику пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов в широкозонных оптических материалах с подвижными катионами малого радиуса, на основании которых был разработан и реализован программный комплекс (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011616814). Ключевой особенностью разработанного подхода является решение уравнения Смолуховского для нахождения корреляционной функции $Y(r, t)$ разнотипных дефектов, которое учитывает диффузионный процесс в системе подвижных реагентов и туннельный перенос электрона между антиморфными дефектами. Для каждого объекта исследования установлены основные функциональные зависимости, описывающие кинетику (10 нс-10 с) пострадиационных процессов после импульсного радиационного воздействия наносекундной длительности; проведена параметризация и получены значения параметров наилучшей аппроксимации. Результаты исследования создают основу для использования найденных зависимостей в практических расчетах кинетики пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов.

2. На основании результатов экспериментального и теоретического исследования температурной зависимости кинетики пострадиационных процессов выявлены два альтернативных сценария релаксации радиационных дефектов. Установлено, что в системе «замороженных» дефектов (низкотемпературная система неподвижных дефектов) кинетика пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов в широкой временной области 10 нс -10 с подчиняется единой функциональной зависимости (теоретической кривой) в системе введенных безразмерных параметров; все различия в форме наблюдаемых кинетических кривых объясняются тем, что реальные кинетические кривые проецируются на различные участки одной и той же теоретической кривой в системе безразмерных параметров. При увеличении температуры выше температурного порога термостимулированной подвижности дефектов (система подвижных дефектов) кинетика пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов в широкой временной области 10 нс -10 с характеризуется двумя стадиями. Начальная стадия не зависит от температуры, контролируется процессом туннельного переноса электрона между антиморфными дефектами и подчиняется функциональной

зависимости кинетики туннельной рекомбинации в системе неподвижных дефектов. Конечная стадия кинетики контролируется диффузионным процессом в системе подвижных дефектов и асимптотически стремится к гиперболической зависимости первого порядка. Термостимулированное смещение конечной стадии в область меньших времен затухания обусловлено температурной зависимостью коэффициента взаимной диффузии разнотипных дефектов.

3. Исследование пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов катионной подрешетки в нелегированных кристаллах с водородными связями (ADP и KDP), проведенное с помощью экспериментальных (импульсная абсорбционная спектроскопия) и расчетных (разработанный программный комплекс) методов, выявило особенности кинетики релаксации, характерные для оптических материалов с $3D$ -системой подвижных дефектов в виде катионов малого радиуса (протонов). Установлено, что особенности кинетики релаксации дефектов в кристаллах ADP и KDP обусловлены диффузионным процессом в $3D$ -системе подвижных катионов и туннельным переносом электрона между антиморфными дефектами водородной подрешетки. Объяснена природа плотностного эффекта в кристаллах ADP и KDP. Показано, что «укорочение» кинетики затухания короткоживущего оптического поглощения, наблюдаемое при повышении плотности энергии импульса возбуждения, обусловлено обратной зависимостью постоянной времени затухания кривой $n(t)/n_0$ от плотности энергии импульса возбуждения.

4. На основании экспериментальных и расчетных результатов исследования кинетики пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов в нелегированных кристаллах боратов лития (LTB и LBO) выявлены особенности этой кинетики, характерные для оптических материалов с $1D$ -системой подвижных катионов малого радиуса (ионы лития). Установлено, что в широкой области времени затухания (100 нс - 1 с) кинетика пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов LTB и LBO обусловлена диффузионным процессом в системе подвижных катионов лития и туннельным переносом электрона между антиморфными дефектами литиевой подрешетки.

5. Кинетика пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов в нелегированных (LGBO) и легированных (LGBO:Ce) оптических кристаллах двойного ортобората лития-гадолиния с $1D$ -системой подвижных катионов малого радиуса (ио-

ны лития) исследована с применением экспериментальных и расчетных методов. Установлено, что для широкой области времени затухания (100 нс - 1 с) кинетика пострадиационных процессов релаксации обусловлена диффузионным процессом в системе подвижных катионов лития и туннельным переносом электрона между антиморфными дефектами литиевой подрешетки. На основании полученных экспериментальных данных по температурной зависимости кинетики короткоживущего оптического поглощения в температурной области подвижности катионных дефектов была выполнена параметризация модели и определены параметры наилучшей аппроксимации, характеризующие диффузионный процесс в литиевой подрешетке LGBO.

6. На основании расчетных данных и экспериментальных результатов, полученных совместным применением двух спектроскопических методов с временным разрешением (импульсная абсорбционная спектроскопия и импульсная катодоллюминесценция) выдвинута модель, объясняющая влияние пострадиационных процессов релаксации радиационных дефектов на кинетику излучательного распада низкоэнергетических электронных возбуждений в легированных оптических материалах с 1D-подвижными катионами малого радиуса (ионы лития). В рамках выдвинутой модели особенности кинетики ИКЛ LGBO:Ce объясняются туннельным переносом электрона между радиационными дефектами и примесными Ce(IV) центрами, приводящим к формированию короткоживущих Ce(III) центров в возбужденном состоянии.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Огородников И.Н., **Киселева М.С.** Кинетика туннельного переноса электрона между антиморфными дефектами в оптических кристаллах с подвижными катионами // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2012. Т.142, вып.1. С.169-180 (1,0 п.л. / 0,1 п.л.).
2. Огородников И.Н., **Киселева М.С.** Кинетика туннельного переноса электрона в кристаллах с водородными связями KN_2PO_4 и $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ // Физика твердого тела 2012. Т.54, вып. 2. С. 258-263 (0,5 п.л. / 0,1 п.л.).
3. Огородников И.Н., **Киселева М.С.** Кинетика короткоживущего оптического поглощения в кристаллах боратов лития $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ и LiB_3O_5 // Физика твердого тела 2012. Т.54, вып.4. С.697-703. (0,5 п.л. / 0,1 п.л.).
4. Ogorodnikov I.N., **Kiseleva M.S.**, Yakovlev V.Yu. A pulsed optical absorption spectroscopy study of wide band-gap optical materials // Optical Materials 2012. V.34, Is.12. P. 2030-2034. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.).
5. Ogorodnikov I.N., **Kiseleva M.S.**, Yakovlev V.Yu. A pulsed optical characterization of non-linear lithium borate crystals // JOSA B 2012. V.29, N3. P.370-376. (0,6 п.л. / 0,1 п.л.).
6. Огородников И.Н., **Киселева М.С.**, Седунова И.Н., Кинетика туннельного переноса электрона, стимулированного подвижностью катионов лития в кристаллах ортобората лития-гадолиния // Химия высоких энергий. 2012, Т. 46, вып. 3. С. 199-204. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).

7. Ogorodnikov I.N., **Kiseleva M. S.**, Yakovlev V.Yu. A pulsed optical characterization of optical crystals with mobile cations // Изв. ВУЗов. Физика. 2012. Т.55, вып.11/3. С.141-146. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.).

8. Ogorodnikov I. N., **Kiseleva M. S.**, Vostrov D.O., Sedunova I. N., Yakovlev V.Yu. Optical and luminescence properties of lithium gadolinium orthoborate // Изв. ВУЗов. Физика. 2014, Т. 57, вып. 12/3. С. 32-36. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).

9. Ogorodnikov I. N., **Kiseleva M. S.**, Vostrov D.O., Yakovlev V.Yu. Cathodoluminescence kinetics of $\text{Li}_6\text{GdB}_3\text{O}_9$ crystals // J. Lumin. 2015, V.158. P.252-259. (0,5 п.л. / 0,3 п.л.).

Патенты и свидетельства

10. Киселева М.С., Огородников И.Н., Программный модуль «Кинетические модели туннельной рекомбинации, стимулированной подвижностью дефектов ("КМТР-1")», Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011616814. Дата поступления 07 июля 2011 г. (Заявка №2011615033), зарегистрировано в едином реестре программ для ЭВМ 01 сентября 2011 г.

Другие публикации

11. **Киселева М. С.**, Огородников И. Н., Седунова И. Н., Моделирование кинетики туннельного переноса электрона в кристаллах с водородными связями // Физика. Научный журнал. Бишкек. 2011. Т.1. С.18-23. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.).

12. Огородников И.Н., **Киселева М.С.**, Седунова И.Н., Моделирование туннельного переноса электрона в кристаллах с водородными связями // Проблемы спектроскопии и спектрометрии: межвуз. сб. науч. тр. Екатеринбург: УрФУ. 2011. Вып. 28. С. 51-59. (0,75 п.л. / 0,2 п.л.).

13. Киселева М. С. Программный комплекс для моделирования кинетики туннельного переноса электрона в органических и неорганических системах / Огородников И.Н., **Киселева М. С.**, Седунова И.Н. // Материалы международной научно-методической конференции «Новые образовательные технологии в вузе», Екатеринбург: УрФУ. 2011. С.345-348. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.).

14. Киселева М.С. Моделирование кинетики туннельного переноса электрона в органических и неорганических системах / **М.С. Киселева**, И.Н. Огородников // Тезисы 17-ой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых. 2011. С. 388. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.).

15. Киселева М.С. Кинетика туннельного переноса электрона в кристаллах боратов лития $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ и $\text{Li}_2\text{B}_3\text{O}_5$ / **М.С. Киселева**, И.Н. Огородников // Тезисы XII Всероссийской молодёжной школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества. 2011. С. 84. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.).

16. Kiseleva M. Simulation of tunneling electron transfer kinetics in crystals with hydrogen bonds / **Kiseleva M.**, Ogorodnikov I.N. // Abstract book of the 3rd Russian-German Travelling Seminar "Synchrotron Radiation for Physics and Chemistry of Nano Materials". 2011. С.28-30. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.).

17. Киселева, М.С. Оптические и люминесцентные свойства кристаллов ортобората лития-гадолиния / **М.С. Киселева**, И.Н. Огородников, И.Н. Седунова, Д.О. Востров, В.Ю. Яковлев // Тезисы. Первая международная молодежная научная конференция, посвященная 65-летию основания Физико-технологического института. 2014. С. 80-81. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.).

18. Kiseleva, M.S. Optical and luminescence properties of lithium gadolinium orthoborate crystal / **M.S. Kiseleva**, I.N. Ogorodnikov, I.N. Sedunova, D.O. Vostrov, V.Yu. Yakovlev // Abstracts of 4th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. 2014. С. 448. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.).

19. **Kiseleva, M.S.** Pulse cathodoluminescence kinetics of lithium orthoborate crystals / M.S. Kiseleva, I.N. Ogorodnikov // Abstracts of 5th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. 2016. С. 371. (0,1 п.л. / 0,1 п.л.).

Подписано в печать
Офсетная печать

Формат 60x84 1/16
Тираж 100 экз.

Бумага писчая
Заказ №