



На правах рукописи

ВОСТРОВ Дмитрий Олегович

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ, ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И  
ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННЫЕ РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В  
МОНОКРИСТАЛЛАХ И КРИСТАЛЛОВЛОКНАХ  $\text{Li}_6\text{GdV}_3\text{O}_9:\text{Ce}$**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2015

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

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

Официальные оппоненты: **Арбузов Валерий Иванович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный  
исследовательский университет информационных  
технологий, механики и оптики», профессор кафедры  
оптоинформационных технологий и материалов;

**Спирина Альфия Виликовна**,  
кандидат физико-математических наук, ФГБУН  
Институт электрофизики УрО РАН, научный сотруд-  
ник лаборатории квантовой электроники

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Том-  
ский политехнический университет»

Защита диссертации состоится «04» декабря 2015 г. в 15:00 часов на заседа-  
нии диссертационного совета Д.212.285.02 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский фе-  
деральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по ад-  
ресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, аудитория И-420 (зал Ученого сове-  
та).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.  
Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Ищенко Алексей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современные оптические материалы для практических применений в широком диапазоне энергий от инфракрасной (ИК) до вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) областей спектра, должны удовлетворять многим весьма жестким требованиям. Семейство двойных ортоборатов щелочного металла - трехвалентного редкоземельного металла, в частности, кристаллы  $\text{Li}_6\text{MeV}_3\text{O}_9:\text{Re}$  ( $\text{Me} = \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Ho}, \text{Lu}, \text{Yb}, \text{Y}$ ), легированные примесными ионами  $\text{Re} = \text{Eu}, \text{Ce}, \text{Y}$ , являются одним из перспективных направлений таких исследований. Перспективными направлениями их практического применения являются не только твердотельные радиационные детекторы, но также активные элементы коротковолновой лазерной и световой техники.

Кристаллы  $\text{LGBO}:\text{Re}$  прозрачны в широкой области спектра, обладают высокой радиационно-оптической устойчивостью и имеют следующие преимущества. Во-первых, в состав LGBO входят химические элементы В, Li и Gd, имеющие стабильные изотопы с высокими сечениями захвата тепловых и медленных нейтронов с энергией ниже нескольких килоэлектрон-вольт, что делает возможными различные нейтрон-захватные реакции. Во-вторых, кристаллы LGBO характеризуются высокой изоморфной емкостью для вхождения трехвалентных редкоземельных ионов в качестве примесей замещения в позиции матричных ионов  $\text{Gd}^{3+}$ . В-третьих, в LGBO имеет место эффективный канал передачи энергии электронных возбуждений от матрицы к трехвалентным примесным ионам. Переход к кристалловолоконной форме позволяет не только улучшить сцинтилляционные свойства материала за счет более эффективного светосбора, но и открывает новые возможности в области кристалловолоконной лазерной и световой техники.

Несмотря на огромный интерес к данному материалу, до сих пор выполнено очень мало исследований фундаментального плана в области изучения электронной структуры, люминесценции и термостимулированных рекомбинационных процессов с участием дефектов решетки. Особенно это касается области низких температур: имеют место фрагментарные данные по монокристаллам и практически полностью отсутствуют данные для кристалловолоконных образцов.

**Степень разработанности проблемы исследования.** Результаты исследования  $\text{LGBO}:\text{Re}$ , нацеленные на прикладные аспекты, свидетельствуют, что до-

стигнутые характеристики данного оптического материала далеки от теоретических пределов. Установление причин такого положения дел требует выполнения фундаментальных исследований электронной структуры и процессов переноса энергии электронных возбуждений в широкой области энергий. Несмотря на огромный интерес к данному материалу, до сих пор выполнено очень мало исследований фундаментального плана в области изучения электронной структуры, люминесценции и термостимулированных рекомбинационных процессов с участием дефектов решетки. Особенно это касается области низких температур: имеют место фрагментарные данные по монокристаллам и практически полностью отсутствуют данные для кристалловолоконных образцов. Несмотря на предполагаемые различия с точки зрения первичной дефектности, до сих пор не проводилось сравнительного исследования монокристаллических и кристалловолоконных образцов  $\text{LGBO:Re}$  в широких температурной и спектральной областях.

**Целью настоящей работы** является комплексное экспериментальное исследование электронной структуры и процессов переноса энергии электронных возбуждений в кристаллах и кристалловолоконных образцах  $\text{LGBO}$ , легированных трехвалентными примесными ионами  $\text{Ce}^{3+}$  ( $\text{LGBO:Ce}$ ) с использованием техники люминесцентной и оптической спектроскопии в широких температурной (10-500 К) и энергетической (1.2-21 эВ) области.

Для достижения поставленной цели потребовалось выполнить комплекс исследований и решить следующие **задачи**:

1. Экспериментально изучить параметры электронной структуры и процессы релаксации электронных возбуждений в монокристаллических образцах  $\text{LGBO:Ce}$  методом низкотемпературной ( $T = 10$  и  $30$  К) люминесцентно-оптической ВУФ-спектроскопии при селективном фотовозбуждении синхротронным излучением в области низкоэнергетического края фундаментального поглощения.
2. В диапазоне температур от 10 до 500 К исследовать фотолюминесцентные характеристики (спектры фотолюминесценции (ФЛ) и возбуждения фотолюминесценции (ВФЛ), а также температурные зависимости интенсивности ФЛ) монокристаллических и кристалловолоконных образцов  $\text{LGBO:Ce}$  методом фотолюминесцентной спектроскопии при селективном фотовозбуждении различными энергиями.

3. Исследовать кинетику неравновесных процессов и процессов создания и эволюции короткоживущих радиационно-индуцированных дефектов в монокристаллических и кристалловолоконных образцах LGBO:Ce времяразрешенными методами импульсной абсорбционной спектроскопии и импульсной катодолюминесценции при возбуждении электронным пучком наносекундной длительности при комнатной температуре.
4. В диапазоне температур от 10 до 500 К методами стационарной рентгенолюминесценции (РЛ) и термостимулированной люминесценции (ТСЛ) исследовать термостимулированные рекомбинационные процессы с участием мелких центров захвата в монокристаллических и кристалловолоконных образцах LGBO:Ce.
5. Методом математического моделирования изучить термостимулированные рекомбинационные процессы, происходящих в монокристаллических и кристалловолоконных образцах LGBO:Ce в области температур 80-500 К, установить знаки делокализующихся носителей в пиках ТСЛ, выяснить сходство и различия в кинетике рекомбинационных процессов монокристаллических и кристалловолоконных образцов LGBO:Ce.

**Объектами исследования** являются практически значимые оптические материалы – монокристаллические и кристалловолоконные образцы LGBO:Ce.

**Научная новизна.** В широком температурном (10-500 К) и энергетическом (1.2-21 эВ) диапазонах выполнено комплексное экспериментальное исследование параметров электронной структуры, процессов переноса энергии электронных возбуждений и их релаксации, фотолюминесцентных свойств, термостимулированных рекомбинационных процессов, и процессов формирования радиационно-индуцированных дефектов в монокристаллических и кристалловолоконных образцах LGBO:Ce. Впервые получены следующие результаты:

1. Методом низкотемпературной люминесцентно-оптической ВУФ-спектроскопии сняты низкотемпературные ( $T = 10$  и  $30$  К) спектры отражения и ВФЛ монокристаллов LGBO, на основании дисперсионного анализа определены значения минимальной энергии для межзонных переходов в анионной подрешетке LGBO  $E_g = 9.4$  эВ, положение первого экситонного максимума  $E_{n=1} = 7.5$  эВ для возбуждения анионных эксито-

нов, энергетическое положение и свойства полосы поглощения с переносом заряда O-Gd  $E_{CT} = 6.8$  эВ, энергетический порог возбуждения катионных экситонов в цепочках катионов  $Gd^{3+}$   $E_C = 6.6$  эВ.

2. Методом фотолюминесцентной спектроскопии при селективном возбуждении в диапазоне температур от 10 до 500 К для монокристаллических и кристалловолоконных образцов LGBO:Ce сняты спектры ФЛ, ВФЛ и температурные зависимости интенсивности ФЛ. Обнаружена новая интенсивная низкотемпературная полоса ФЛ при 1.9 эВ (FWHM = 0.3 эВ), проявляющаяся только в кристалловолоконных образцах LGBO:Ce.
3. Методами импульсной абсорбционной спектроскопии и импульсной катодолуминесценции (ИКЛ) сняты спектры, кинетика затухания ИКЛ и короткоживущего оптического поглощения (КОП) для монокристаллических и кристалловолоконных образцов LGBO:Ce. На основании результатов численного моделирования пострадиационных рекомбинационных процессов, обуславливающих КОП и ИКЛ, предложена альтернативная модель возбуждения ИКЛ с участием собственных дефектов решетки и примесных ионов церия.
4. Спектры стационарной РЛ, температурные зависимости интенсивности стационарной РЛ и кривые ТСЛ монокристаллических и кристалловолоконных образцов LGBO:Ce изучены в широком диапазоне температур от 10 до 500 К.
5. Методом математического моделирования с привлечением экспериментальных данных по ТСЛ в интегральном и спектрально-селективном режимах, исследованы термостимулированные рекомбинационные процессы, происходящие в области температур 80-500 К, установлены знаки делокализующихся носителей в пиках ТСЛ, объяснено сходство и различия в кинетике рекомбинационных процессов монокристаллических и кристалловолоконных образцов LGBO:Ce.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Полученные в работе результаты исследования монокристаллических и кристалловолоконных образцов двойного ортобората лития-гадолиния LGBO:Ce представляют не только научный интерес, но и имеют практическую значимость.

С точки зрения физики конденсированного состояния, полученные результаты имеют фундаментальное значение, поскольку достигнутые глубина и степень изученности данного оптического материала позволяет выдвинуть его на роль модельного объекта для всего семейства  $\text{Li}_6\text{MgB}_3\text{O}_9$ . Впервые полученные в работе экспериментальные данные по низкотемпературным параметрам электронной структуры создают опорный базис для последующих квантовохимических расчетов электронной структуры и фундаментальных спектров LGBO.

С практической точки зрения, полученные результаты имеют важное значение, поскольку оптический материал LGBO:Ce обладает большими перспективами применения в качестве рабочего вещества твердотельных детекторов ионизирующего излучения, активных элементов лазерной и световой техники. В настоящей работе впервые в широких температурном (10-500 К) и спектральном (1.2-21 эВ) диапазонах выполнено детальное сопоставление параметров монокристаллических и кристалловолоконных образцов LGBO:Ce, выявлено их сходство и различия, как в плане формирования первичной дефектности, так и в особенностях переноса и релаксации энергии электронных возбуждений.

Полученные результаты и сформулированные представления о механизмах радиационно-стимулированных процессов могут быть использованы для прогнозирования поведения оптических монокристаллов, кристалловолоконных элементов и устройств на их основе в радиационных полях, разработки технологий целенаправленного измерения их свойств и повышения радиационно-оптической устойчивости. Полученные конкретные данные и разработанные модели создают научные предпосылки для развития, совершенствования и оптимизации новых детекторов корпускулярного излучения, а также активных элементов лазерной и световой техники на основе монокристаллических и кристалловолоконных образцов LGBO:Ce.

#### **Защищаемые положения:**

1. Экспериментальные значения параметров электронной структуры LGBO при  $T = 10$  К, установленные в результате дисперсионного анализа данных низкотемпературной ВУФ-спектроскопии и расчетов оптических функций, имеют следующие значения: минимальная энергия межзонных переходов в боро-кислородном каркасе LGBO  $E_g = 9.4$  эВ, положение первого максимума при возбуждении анионного экситона  $E_{n=1} = 7.5$  эВ,

энергетическое положение и свойства полосы поглощения с переносом заряда O-Gd  $E_{CT} = 6.8$  эВ, пороговая энергия возбуждения катионных экситонов в цепочках ионов  $Gd^{3+}$   $E_C = 6.6$  эВ.

2. Отличительные особенности низкотемпературной люминесценции кристалловолоконных образцов обусловлены наличием дополнительных дефектов, одним из проявлений которых является интенсивная неэлементарная полоса люминесценции в «красной» области спектра: высокоэнергетическая часть полосы (1.9-2.2 эВ) проявляется при прямом фотовозбуждении, тогда как низкоэнергетическая часть полосы (1.6-1.9 эВ) наблюдается только при наличии переноса энергии электронных возбуждений по схеме  $Gd^{3+} \rightarrow Ce^{3+} \rightarrow$  центр «красной» люминесценции.
3. Повышенная интенсивность и неэкспоненциальный характер кинетики затухания d-f люминесценции при возбуждении электронным пучком наносекундной длительности обусловлены альтернативным механизмом возбуждения, ключевым моментом которого является формирование короткоживущих центров  $Ce^{3+}$  в результате туннельного переноса электрона от подвижных радиационных дефектов  $Li^0$ , созданных под действием электронного пучка, к стабильным дефектам решетки  $Ce^{4+}$ .
4. Специфика термостимулированных рекомбинационных процессов в кристалловолоконных образцах обусловлена преобладающим электронным характером рекомбинационных процессов с участием делокализованных носителей заряда и существенным вкладом междефектной туннельной рекомбинации. Учет этой специфики позволяет использовать единую модель для описания термостимулированных рекомбинационных процессов в монокристаллических и кристалловолоконных образцах.

**Личный вклад автора.** Диссертационная работа представляет собой обобщение материалов исследований, выполненных лично автором, а также проведенных совместно с научными сотрудниками при непосредственном участии автора. Постановка задач исследований, поиск путей их решения и выбор направлений и методов исследования были проведены совместно с научным руководителем.

Измерения методом низкотемпературной люминесцентно-оптической ВУФ-спектроскопии выполнены профессором д.ф.-м.н. В.А. Пустоваровым на экспериментальной станции SUPERLUMI в лаборатории HASYLAB (электронный



синхротрон DESY, г. Гамбург, Германия), при этом автору принадлежит постановка задачи и анализ результатов совместно с научным руководителем. Измерения импульсной абсорбционной и люминесцентно-оптической спектроскопии выполнены лично автором в Томском политехническом университете (г. Томск) при методической поддержке профессора д.ф.-м.н. В.Ю. Яковлева. Фотолюминесцентная спектроскопия при селективном фотовозбуждении, РЛ и ТСЛ в широком интервале температур выполнены лично автором в Уральском федеральном университете (г. Екатеринбург). Измерения с использованием электронной и оптической микроскопии выполнены лично автором при методической поддержке доцента к.ф.-м.н. А.В. Ищенко.

Постановка задач исследований, обработка, анализ, обобщение результатов, подготовка научных публикаций и докладов, формулировка защищаемых положений и выводов по диссертационной работе принадлежат лично автору.

**Апробация результатов.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международной школе по физике высоких энергий и ускорительной физике в CERN (г. Женева, Швейцария, 2014); 16-й Международной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов RPC-15 (г. Томск, 2012) и RPC-16 (г. Томск, 2014); Первой Международной молодежной научной конференции посвященная 65-летию основания Физико-технологического института (г. Екатеринбург, 2014); X-ой Исык-Кульской Международной конференции по радиационной физике SCORPH-2013 (г. Бишкек, Киргизия, 2013).

**Публикации.** Основные результаты исследований опубликованы в 13 научных работах, в том числе в 7 статьях в реферируемых российских и зарубежных периодических научных изданиях, входящих в список ВАК, Scopus и Web of Science; в сборнике научных трудов - 1 статья; тезисы докладов конференций - 5.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, выводов, списка сокращений и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 178 страниц, содержит 59 рисунков, 10 таблиц и список цитируемой литературы из 147 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, определены научная новизна полученных результатов и практическая значимость, представлены защищаемые положения и апробация работы.

В **первой главе «Люминесценция, дефекты и электронные возбуждения и LGBO (аналитический обзор)»** рассмотрены особенности кристаллографической структуры, электронной структуры, точечные дефекты, люминесцентные и сцинтилляционные свойства ортоборатов лития. Приведены методы выращивания данных кристаллов и синтеза кристалловолокон.

Кристаллическая решетка LGBO состоит из Li и Gd многогранников, связанных между собой изолированными треугольниками  $\text{BO}_3$  в трехмерный смешанный каркас. Многогранники  $\text{GdO}_8$ , связанные общими ребрами, образуют цепочки вдоль постоянной решетки. Катионы Gd в кристаллической структуре образуют зигзагообразные цепочки, вытянутые вдоль направления  $[0\ 0\ 1]$ , по которым происходит перенос энергии.

В кристаллах  $\text{LGBO:Re}$  в качестве матричных элементов выступают анион кислорода и катионы лития, бора и гадолиния. Трехвалентные ионы  $\text{Gd}^{3+}$  (матричные ионы) и  $\text{Re}^{3+}$  (легирующая примесь) относятся к группе лантаноидов (редкоземельных элементов). Электронная конфигурация лантаноидов имеет вид:  $4f^{0-14}5d^{0-1}6s^2$ . Свойства ионов, связанные с процессом поглощения или излучения света, определяются внутриконтинуальными переходами между  $4f^n$  - состояниями и межконтинуальными переходами между  $4f^n$  и  $5d$ -состояниями.

К точечным дефектам решетки относятся собственные дефекты (вакансии, междоузельные атомы, антиузельные дефекты) и различные примесные дефекты. Для изучения точечных дефектов в оптических материалах используется электронный парамагнитный резонанс, люминесцентно-оптический, спектрально-кинетический и термоактивационный метод.

Собственная люминесценция нелегированных кристаллов LGBO характеризуется излучательными переходами  ${}^6P_J \rightarrow {}^8S_{7/2}$  в матричном ионе  $\text{Gd}^{3+}$ . При введении в кристалл LGBO примесей редкоземельных ионов  $\text{Ce}^{3+}$  происходит замеще-

ние матричных ионов примесными. Данные ионы являются хорошими активаторами. Передача энергии идет только лишь в одну сторону: от матричных ионов к ионам примеси.

Рассмотрены известные данные по сцинтилляционным свойствам кристалла ортобората лития, представляющего интерес, с точки зрения потенциального оптического материала для регистрации нейтронов сцинтилляционным методом.

Во второй главе «Объекты и методы исследования» приведены описания: объектов исследования – монокристаллических и кристалловолоконных образцов LGBO:Ce, результатов исследования их поверхности методами электронной и оптической микроскопии, использованных экспериментальных методов и пакетов прикладных программ.

Объектами исследования являются монокристаллические и кристалловолоконные образцы высокого оптического качества на основе кристаллов ортобората лития  $\text{Li}_6\text{GdB}_3\text{O}_9$ , легированных (0.5-1 мол. %) трехвалентными примесными ионами  $\text{Ce}^{3+}$  (LGBO:Ce). Объемные монокристаллы LGBO:Ce оптического качества были выращены и переданы нам для исследования Л.И. Исаенко в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск, Россия) раствор-расплавным (флюсовым) методом Чохральского с верхним положением затравки при кристаллизации из раствор-расплава. Кристалловолоконные образцы LGBO:Ce оптического качества были синтезированы И.Н. Седуновой в Лионском университете (г. Лион, Франция) методом  $\mu$ -PD микровытягивания.

Микроструктура поверхности монокристаллических и кристалловолоконных образцов LGBO:Ce была изучена нами посредством электронной и оптической микроскопии. Для этого были использованы сканирующий электронный микроскоп SIGMA VP и конфокальный сканирующий оптический микроскоп Axio CSM 700 фирмы ZEISS.

Низкотемпературная ( $T = 10$  и  $30$  К) люминесцентно-оптическая ВУФ-спектроскопия при возбуждении синхротронным излучением выполнена на станции SUPERLUMI (г. Гамбург, Германия). Спектры возбуждения фотолюминесценции (ВФЛ) и спектры отражения были зарегистрированы в энергетическом диапазоне от 4 до 21 эВ при селективном фотовозбуждении синхротронным излу-

чением. Регистрация ФЛ была осуществлена в диапазоне 1.2-6.2 эВ. Одновременно со спектрами ВФЛ, были измерены спектры отражения под углом падения  $17^\circ$ .

Импульсная абсорбционная спектроскопия с наносекундным временным разрешением, а также спектры и кинетика катодолюминесценции монокристаллических и кристалловолоконных образцов LGBO:Ce при возбуждении электронным пучком наносекундной длительности при  $T = 300$  К были выполнены нами в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (г. Томск). Регистрация наведенного короткоживущего оптического поглощения (КОП) и импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) была осуществлена в спектральном диапазоне 1.2-4.0 эВ фотоэлектрическим методом в соответствии с общей схемой полного внутреннего отражения (угол падения  $7^\circ$ ).

Исследование фотолюминесцентных характеристик монокристаллических и кристалловолоконных образцов LGBO:Ce в диапазоне температур  $T = 80-500$  К выполнено нами в лаборатории физики твердого тела кафедры экспериментальной физики УрФУ с использованием специализированной установки для измерения ФЛ и ВФЛ.

Исследование стационарной рентгенолюминесценции (РЛ) и термостимулированной люминесценции монокристаллических и кристалловолоконных образцов LGBO:Ce при возбуждении нефильтрованным рентгеновским излучением лабораторного источника в интервале температур  $T = 80-500$  К выполнено нами в лаборатории физики твердого тела кафедры экспериментальной физики УрФУ с использованием специализированной установки для измерения РЛ и ТСЛ. Возбуждения образцов было выполнено нефильтрованным рентгеновским излучением лабораторного источника (Cu-антикатод,  $U_a = 40$  кВ,  $I_a = 15$  мА). Были зарегистрированы спектры стационарной РЛ в области от 1.5 до 6.2 эВ и кривых ТСЛ в спектрально-интегральном и спектрально-селективном режимах при  $T = 80-500$  К.

Исследования низкотемпературных ФЛ, РЛ и ТСЛ характеристик монокристаллических и кристалловолоконных образцов LGBO:Ce в диапазоне температур  $T = 10-300$  К выполнены нами в лаборатории кафедры экспериментальной физики УрФУ. Спектры стационарной РЛ измерены в интервале энергий от 1.5 до 6.2 эВ при  $T = 10, 50, 100, 150, 200, 250$  и  $300$  К. Кривые ТСЛ в спектрально-

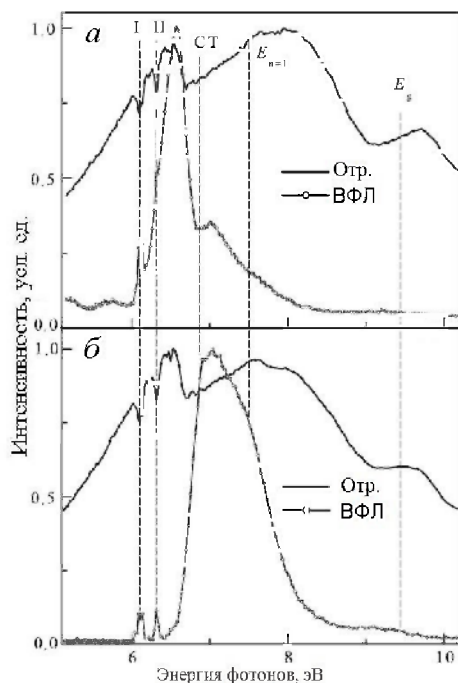


Рисунок 1 – Спектры отражения (Отр.) и спектры возбуждения фотолюминесценции (ВФЛ) для полосы ФЛ при 3.95 эВ, зарегистрированные для монокристалла LGBO при  $T = 10$  (а) и 30 К (б). Римские цифры соответствуют оптическим переходам в ионе  $Gd^{3+}$  из основного состояния  $^8S_{7/2}$  на возбужденные уровни  $^6G_{7/2}$  (I) и  $^6G_{3/2,13/2}$  (II)

процессов в LGBO (рисунок 1). Отметим наиболее важные процессы: 4f-4f оптические переходы в матричных ионах  $Gd^{3+}$ , катионные экситоны, оптические переходы с переносом заряда O-Gd, анионные экситоны и межзонные переходы в борокислородном каркасе кристалла LGBO.

Расчеты дисперсии оптических функций были выполнены в рамках осцилляторной модели. Основываясь на низкотемпературных спектрах отражения и расчетах оптических функций  $\hat{\epsilon}(E)$ ,  $\hat{n}(E)$  и  $\mu(E)$ , были определены параметры электронной структуры кристаллов LGBO: значение минимальной энергии для межзонных переходов борокислородного каркаса кристалла LGBO при  $T = 10$  К -

интегральном режиме были измерены в диапазоне температур от 10 до 300 К. Спектры ФЛ и ВФЛ измерены в интервале от 1.5 до 6.2 эВ при 10 К. Температурная зависимость интенсивности ФЛ измерена в диапазоне от 10 до 400 К.

В третьей главе «Оптические свойства и низкоэнергетические электронные возбуждения» рассмотрены параметры электронной структуры монокристаллов ортобората лития-гадолиния  $Li_6GdV_3O_9$  и излучательная релаксация электронных возбуждений методом низкотемпературной ( $T = 10-30$  К) люминесцентно-оптической ВУФ-спектроскопии при селективном возбуждении синхротронным излучением. В данных экспериментах были изучены низкотемпературные спектры отражения и спектры возбуждения собственной ФЛ кристаллов LGBO при селективном фотовозбуждении в области энергий от 4 до 21 эВ. Основное внимание было уделено диапазону энергий от 5 до 10.2 эВ, где расположены энергетические пороги возбуждения многих важных про-

$E_g = 9.42$  эВ, положение первого пика поглощения для анионного экситона:  $E_{n=1} = 7.46$  эВ, минимальная пороговая энергия возбуждения катионных экситонов в цепочках ионов  $Gd^{3+}$ :  $E_{CT} = 6.80$  эВ. В области энергий, примыкающей к полосе поглощения с переносом заряда O-Gd, в спектрах возбуждения собственной люминесценции кристаллов LGBO при 10 К обнаружена новая полоса с максимумом при 6.57 эВ. Выявлена преобладающая катионная природа электронных возбуждений в процессе возбуждения собственной люминесценции и передачи энергии электронных возбуждений центрам свечения в кристаллах LGBO. Электронные возбуждения борокислородного каркаса (анионные экситоны и межзонные переходы) не оказывают заметного влияния на процессы возбуждения собственной люминесценции и передачу энергии электронных возбуждений центрам свечения в кристалле LGBO. В исследованном диапазоне энергий возбуждения выше  $E_g$  не обнаружено эффективной передачи энергии от матрицы к центрам свечения. Излучательная релаксация возбужденных уровней в кристаллах LGBO происходит вследствие 4f-4f переходов  ${}^6P_J \rightarrow {}^8S_{7/2}$  в матричных ионах  $Gd^{3+}$ , для которых главным каналом возбуждения при температурах выше 30 К является передача энергии электронных возбуждений посредством миграции катионных экситонов. При более низких температурах доминирующим каналом возбуждения собственной люминесценции в кристаллах LGBO являются оптические переходы (полоса поглощения) с переносом заряда от уровней потолка валентной зоны ( $O^{2-}$  2p-орбитали) кристалла LGBO на уровни  $4f^6 5d^1$  в матричном ионе  $Gd^{3+}$ .

В четвертой главе «Люминесценция точечных дефектов» впервые в широком интервале температур от 10 до 500 К, в едином цикле исследований было выполнено экспериментальное изучение люминесценции дефектов в монокристаллических и кристалловолоконных образцах LGBO:Ce. Цикл исследований включал в себя изучение спектров ФЛ, ВФЛ, а также температурных зависимостей интенсивностей ФЛ при различных условиях эксперимента. В дополнение к этому, исследованы спектры и кинетика затухания ИКЛ ( $T = 80$  и  $300$  К) и КОП ( $T = 300$  К).

В кристаллах LGBO:Ce обеих форм (монокристаллы и кристалловолоконные образцы) при всех рассмотренных видах возбуждения наблюдается широкая

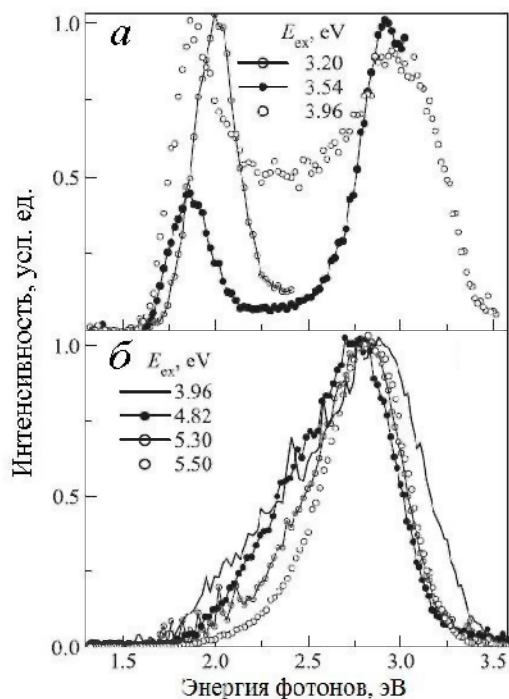


Рисунок 2 – Спектры ФЛ кристалловолокна LGBO:Ce, зарегистрированные при  $T = 80$  (а) и  $300$  К (б) при возбуждении энергией  $E_{ex}$ . Интенсивность каждого спектра нормирована на единицу

Доминирующая полоса возбуждения при  $E_{ex} = 3.0$  эВ совпадает с полосой d-f люминесценции ионов  $Ce^{3+}$ , что обеспечивает эффективную передачу энергии электронных возбуждений от ионов  $Ce^{3+}$  к центрам «красной» люминесценции.

В отличие от монокристаллов, кристалловолоконные образцы LGBO:Ce характеризуются низкой эффективностью собственной люминесценции при  $3.97$  эВ, обусловленной 4f-4f переходами в ионах  $Gd^{3+}$ . Спектроскопические данные свидетельствуют, что вероятной причиной этого в кристалловолоконных образцах является повышенное содержание различных дефектов, которые блокируют перенос энергии катионных экситонов вдоль цепочек матричных ионов  $Gd^{3+}$ .

Выявлено наличие нескольких различных механизмов температурного тушения d-f люминесценции ионов  $Ce^{3+}$  в кристаллах LGBO:Ce. В случае возбужде-

полоса d-f люминесценции примесных ионов  $Ce^{3+}$ . Спектроскопические данные свидетельствуют о наличии центров свечения двух типов: центр типа Ce1 (полоса ФЛ при  $2.0$ - $2.5$  эВ) и центр типа Ce2 (полоса ФЛ при  $2.5$ - $3.1$  эВ).

Обнаружена и исследована интенсивная низкотемпературная ( $T = 80$  К) полоса ФЛ в «красной» области спектра при  $E_m = 1.93$  эВ, которая проявляется только в кристалловолоконных образцах LGBO:Ce (рисунок 2). Спектральный профиль полосы является неэлементарным: энергетическое положение максимума варьируется от  $1.8$  до  $2.0$  эВ ( $FWHM = 0.29$ - $0.40$  эВ) в зависимости от условий эксперимента; низкоэнергетический скат полосы ( $1.6$ - $1.9$  эВ) наблюдается только при наличии переноса энергии электронных возбуждений  $Gd^{3+} \rightarrow Ce^{3+}$ ; высокоэнергетический скат полосы ( $1.9$ - $2.2$  эВ) проявляется только при прямом фотозвозбуждении.

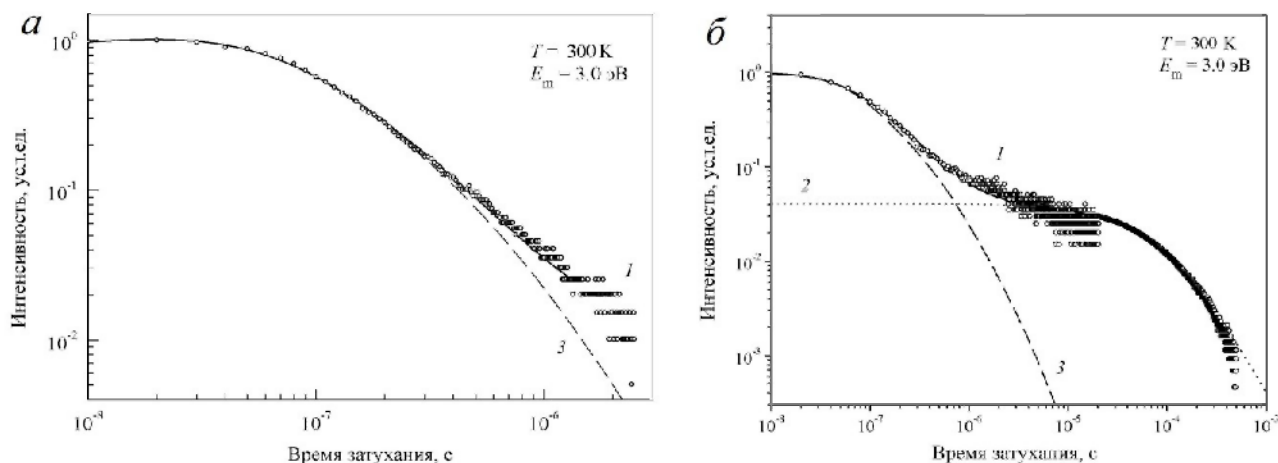


Рисунок 3 – Кинетика затухания ИКЛ монокристаллических (а) и кристалловолоконных (б) образцов LGBO:Ce при  $T = 300$  К, зарегистрированной люминесценции при  $E_m = 3.0$  эВ (1) и гиперболическая зависимость второго порядка (2), соответствующая вкладу рекомбинационного процесса. Для сравнения приведен расчетный вклад туннельного компонента (3)

ния нижних  $5d$ -уровней ионов  $Ce^{5+}$  ( $E_{ex} = 3.6-4.5$  эВ) наблюдается внутрицентровое тушение, соответствующее закону Мотта ( $E_a = 0.3$  эВ,  $T_{1/2} = 350$  К). Стимулирование высоковозбужденных  $5d$ -состояний ионов  $Ce^{5+}$  ( $E_{ex} > 4.5$  эВ) в кристалловолоконных образцах LGBO:Ce приводит к внешнему тушению, происходящему через перенос электрона с высоковозбужденных  $5d$ -уровней ионов  $Ce^{3+}$  на состояния дна зоны проводимости кристалла ( $E_a = 0.7$  эВ,  $T_{1/2} = 470$  К).

Для монокристаллов и кристалловолоконных образцов LGBO:Ce в едином цикле исследования при возбуждении электронным пучком наносекундной длительности были получены экспериментальные данные по спектрам и кинетике затухания ИКЛ ( $T = 80$  и  $300$  К) и КОП ( $T = 300$  К).

Предложен и экспериментально обоснован альтернативный механизм возбуждения ИКЛ, ключевым моментом которого является учет ранее установленного факта, что воздействие электронного пучка наносекундной длительности приводит к образованию короткоживущих дефектов катионной подрешетки в виде междоузельных атомов лития ( $Li^0$ ). Экспериментально обосновано, что туннельный перенос электрона между центрами  $Li^0$  и  $Ce^{4+}$  ведет к перезарядки примесного иона церия и формированию короткоживущего  $Ce^{3+}$  центра в возбужденном



состоянии. Излучательное снятие возбуждения приводит к дополнительному вкладу в полосу d-f люминесценции ионов  $\text{Ce}^{3+}$ . Предложенный альтернативный механизм возбуждения LGBO:Ce объясняет как повышенную интенсивность люминесценции при возбуждении электронным пучком наносекундной длительности, так и неэкспоненциальный характер кинетики затухания ИКЛ (рисунок 3).

В пятой главе «Термостимулированные рекомбинационные процессы» впервые выполнено комплексное исследование термостимулированных рекомбинационных процессов в монокристаллических и кристалловолоконных образцах LGBO:Ce в широкой области температур 10-500 К. Для всей области температур получены экспериментальные результаты по спектрам стационарной РЛ и кривым ТСЛ, которые были дополнены результатами математического моделирования термостимулированных рекомбинационных процессов. Численное моделирование было выполнено путем решения полной системы дифференциальных уравнений электронного баланса в рамках единой унифицированной модели.

Установлено, что во всей исследованной области температур спектры стационарной РЛ всех исследованных образцов LGBO:Ce характеризуются дублетом при 400-420 нм (2.95–3.1 эВ), который обусловлен излучательными d-f переходами в примесных ионах  $\text{Ce}^{3+}$ . Максимальная интенсивность люминесценции наблюдается при температуре  $T = 250$  К. Кроме того, в спектрах РЛ монокристаллических образцов LGBO:Ce наблюдается узкая полоса (пик) при 313 нм, которая обусловлена излучательными  ${}^6\text{P}_1 \rightarrow {}^8\text{S}_{7/2}$  переходами в матричных ионах  $\text{Gd}^{3+}$ .

Изучены кривые ТСЛ после предварительного возбуждения рентгеновским излучением при  $T = 10$  и 80 К. Особенностью данного цикла измерений явилось использование двух (спектрально-интегральный и спектрально-селективный) режимов регистрации ТСЛ. Экспериментальные данные по спектрально-селективной ТСЛ, зарегистрированной люминесценции в полосах при 400-420 нм и 313 нм, позволили выделить кривые ТСЛ, обусловленные процессами электронной рекомбинации и процессами дырочной рекомбинации.

Выдвинута и экспериментально обоснована унифицированная математическая модель, которая описывает процессы термостимулированной рекомбинации в монокристаллических и кристалловолоконных образцах LGBO:Ce (рисунок 4).

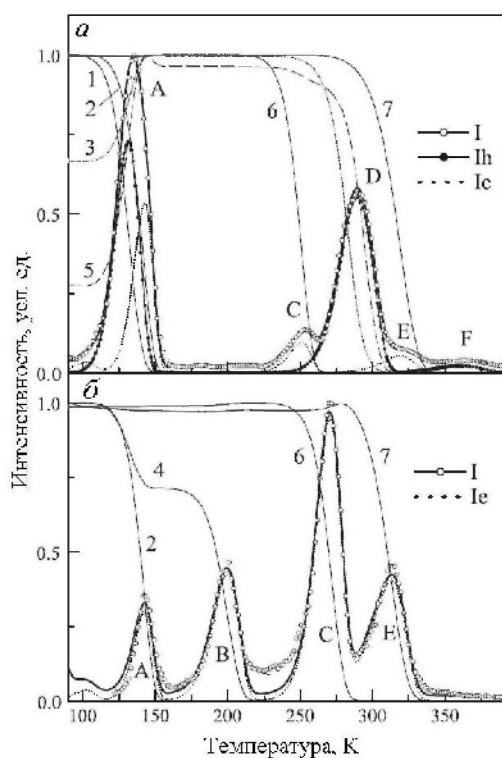


Рисунок 4 – Расчетные кривые ТСЛ для монокристаллических (а) и кристалловолоконных образцов (б): спектрально-интегральная люминесценция ( $I$ ); вклад дырочных ( $I_h$ ) и электронных ( $I_e$ ) рекомбинационных процессов в спектрально-интегральную ТСЛ; нормированные значения концентрации для носителей заряда на центрах захвата:  $n_2 - (1)$ ,  $n_3 - (2)$ ,  $n_4 - (3)$ ,  $n_5 - (4)$ ,  $n_6 - (5)$ ,  $n_7 - (6)$ ,  $n_9 - (7)$ . Светлые кружки показывают экспериментальные данные для спектрально-интегральной ТСЛ; символы  $A-F$  маркируют экспериментально наблюдаемые пики ТСЛ

интерпретировали как  $O^-$ -центр в виде дырки, локализованной на  $2p$ -орбитали иона кислорода.

С точки зрения рекомбинационных процессов, кристалловолоконные образцы характеризуются наличием двух отличительных особенностей: во-первых, наличием безызлучательной дырочной рекомбинации на электронных центрах  $E3$ ,  $E5$  и  $E11$ ; во-вторых, наличием глубоких дырочных центров захвата  $H10$ . Результатом для кристалловолоконных образцов является преобладающий электронный характер рекомбинационных процессов и существенный вклад туннельной рекомбинации. Центр  $E11$  является одним из возможных партнеров туннельной рекомбинации.

Основные результаты интерпретации экспериментальных данных в рамках выдвинутой модели заключаются в следующем. Обнаружен низкотемпературный неэлементарный пик ТСЛ при 125–155 К (пик 'A'). Низкотемпературная часть пика обусловлена делокализацией дырок из центров  $H2$ , высокотемпературная часть пика обусловлена делокализацией электронов из центров  $E3$ . В кристалловолоконных образцах наблюдается только высокотемпературная часть пика 'A'. Дырочный центр захвата  $H2$  сопоставим с собственным дефектом  $A$ -типа, который ранее наблюдали в бинарных боратах лития и

Показано, что пик 'D' в температурной области 250-310 К обусловлен системой двух конкурирующих дырочных центров  $H4$  и  $H6$ . Пик 'B' обусловлен делокализацией электронов из центра  $L5$ . Глубокие дырочные центры захвата  $H8$  можно связать с примесным центром  $Ce^{3+}$ .

Выполнение объединенного цикла экспериментальных и теоретических исследований для образцов монокристаллов и кристалловолокон литий гадолиниевого ортобората позволило, впервые получить значительное количество новых данных о механизмах термостимулированных рекомбинационных процессов в монокристаллических и кристалловолоконных образцах LGBO:Ce. Это заложило научные основы для дальнейшего исследования процессов формирования дефектов и переноса энергии электронных возбуждений в монокристаллических и кристалловолоконных образцах LGBO:Ce при легировании различными примесями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В едином цикле измерений впервые выполнено комплексное экспериментальное исследование параметров электронной структуры и процессов переноса энергии электронных возбуждений в монокристаллических и кристалловолоконных образцах LGBO:Ce с использованием инструментальных методов люминесцентной и оптической спектроскопии в широком температурном (10-500 К) и энергетическом (1.2-21 эВ) диапазонах, интегральной и спектрально-селективной термостимулированной люминесценции, а также времяразрешенными методами импульсной абсорбционной спектроскопии и импульсной катодолюминесценции. В дополнение к инструментальным методам в работе использованы расчетные методы: дисперсионный анализ оптических спектров и математическое моделирование термостимулированных рекомбинационных процессов.

Основные выводы проведенной работы состоят в следующем.

1. Методом низкотемпературной люминесцентно-оптической ВУФ-спектроскопии впервые получены низкотемпературные ( $T = 10$  и  $30$  К) спектры отражения и возбуждения собственной ФЛ монокристаллов LGBO при селективном фотовозбуждении синхротронным излучением. Основываясь на результатах дисперсионного анализа низкотемпературных спектров отражения и расчетах оп-

тических функций  $\hat{\varepsilon}(E)$ ,  $\hat{n}(E)$  и  $\mu(E)$ , определены параметры электронной структуры кристаллов LGBO: значение минимальной энергии межзонных переходов в борокислородном каркасе LGBO  $E_g = 9.4$  эВ ( $T = 10$  К), положение первого максимума при возбуждении анионного экситона  $E_{n=1} = 7.5$  эВ, энергетическое положение и свойства полосы поглощения с переносом заряда O-Gd -  $E_{CT} = 6.8$  эВ, пороговая энергия возбуждения катионных экситонов в цепочках ионов  $Gd^{3+}$  -  $E_{CT} = 6.6$  эВ.

2. В широком интервале температур от 10 до 500 К были изучены спектры ФЛ, возбуждения ФЛ, а также температурные зависимости интенсивности ФЛ при различных условиях эксперимента. Помимо двух типичных полос d-f люминесценции примесных ионов  $Ce^{3+}$  при 2.0-2.5 эВ (Ce1) и 2.5-3.1 эВ (Ce2), обусловленных ионами церия в различных кристаллографических позициях; обнаружена новая интенсивная низкотемпературная полоса ФЛ в «красной» области спектра, которая проявляется только в кристалловолоконных образцах LGBO:Ce при 80 К. Положение максимума этой неэлементарной полосы варьируется от 1.8 до 2.0 эВ (FWHM = 0.29-0.40 эВ) в зависимости от условий эксперимента; низкоэнергетическая часть полосы (1.6-1.9 эВ) наблюдается только при наличии переноса энергии электронных возбуждений  $Gd^{3+} \rightarrow Ce^{3+}$ ; высокоэнергетическая часть полосы (1.9-2.2 эВ) проявляется только при прямом фотовозбуждении. Доминирующая полоса возбуждения при  $E_{ex} = 3.0$  эВ совпадает с полосой d-f люминесценции ионов  $Ce^{3+}$ , что обеспечивает эффективную передачу энергии электронных возбуждений от ионов  $Ce^{3+}$  к центрам «красной» люминесценции.

3. Выявлено наличие различных механизмов температурного тушения d-f люминесценции ионов  $Ce^{3+}$  в кристаллах LGBO:Ce. При возбуждении самых нижних 5d-уровней ионов  $Ce^{3+}$  ( $E_{ex} = 3.6-4.5$  эВ) наблюдается внутрицентровое тушение, соответствующее закону Мотта ( $E_a = 0.3$  эВ,  $T_{1/2} = 350$  К). Стимулирование высоковозбужденных 5d-состояний ионов  $Ce^{3+}$  ( $E_{ex} > 4.5$  эВ) в кристалловолоконных образцах LGBO:Ce приводит к внешнему тушению, происходящему через перенос электрона с высоковозбужденных 5d-уровней ионов  $Ce^{3+}$  на состояния дна зоны проводимости кристалла ( $E_a = 0.7$  эВ,  $T_{1/2} = 470$  К).

4. На основании данных, полученных времяразрешенными методами импульсной абсорбционной спектроскопии и импульсной катодолюминесценции, предложен и экспериментально обоснован альтернативный механизм возбуждения ИКЛ, ключевым моментом которого является учет ранее установленного факта, что воздействие электронного пучка наносекундной длительности приводит к образованию короткоживущих дефектов катионной подрешетки в виде междоузельных атомов лития ( $Li^0$ ). Экспериментально обосновано, что туннельный перенос электрона между центрами  $Li^0$  и  $Ce^{4+}$  ведет к перезарядки примесного иона церия и формированию короткоживущего  $Ce^{3+}$  центра в возбужденном состоянии. Излучательное снятие возбуждения приводит к дополнительному вкладу в полосу d-f люминесценции ионов  $Ce^{3+}$ . Предложенный альтернативный механизм возбуждения LGBO:Ce объясняет как повышенную интенсивность люминесценции при возбуждении электронным пучком наносекундной длительности, так и неэкспоненциальный характер кинетики затухания ИКЛ.

5. Термостимулированные рекомбинационные процессы в монокристаллических и кристалловолоконных образцах LGBO:Ce впервые исследованы в широком диапазоне температур 10-500 К с применением методов стационарной РЛ, интегральной и спектрально-селективной ТСЛ. Экспериментальные данные по спектрально-селективной ТСЛ позволили экспериментально выделить термостимулированные процессы, обусловленные электронной и дырочной рекомбинациями.

6. Выдвинута и экспериментально обоснована унифицированная математическая модель, которая описывает термостимулированные рекомбинационные процессы в монокристаллических и кристалловолоконных образцах LGBO:Ce. С точки зрения рекомбинационных процессов, кристалловолоконные образцы характеризуются наличием двух отличительных особенностей: во-первых, наличием безызлучательной дырочной рекомбинации на электронных центрах  $E3$ ,  $E5$  и  $E11$ ; во-вторых, наличием глубоких дырочных центров захвата  $H10$ . Результатом для кристалловолоконных образцов выявили преобладающий электронный характер рекомбинационных процессов и существенный вклад туннельной рекомбинации. Центр  $E11$  является одним из возможных партнеров туннельной рекомбинации.

Консолидированный анализ экспериментальных данных и результатов математического моделирования позволил установить знаки делокализуемых носителей для всех пиков ТСЛ в области 80-350 К и высказать обоснованные предположения относительно интерпретации центров захвата и рекомбинации.

7. Основные отличия между монокристаллическими и кристалловолоконными образцами заключаются в следующем:

- наличие дефектов, присутствующих только в кристалловолокне и проявляющихся в виде интенсивной полосы ФЛ в «красной» области спектра при 1.9 эВ и интенсивной туннельной люминесценции при температурах ниже комнатной;
- альтернативный механизм возбуждения катодолюминесценции церия в кристалловолокне через формирование короткоживущих  $\text{Ce}^{3+}$  центров в результате взаимодействия с дефектами решетки;
- преимущественно электронный характер рекомбинационных процессов в кристалловолокне в отличие от монокристалла, где в равной степени наблюдаются процессы электронной и дырочной рекомбинации. Установление этого факта позволило дать объяснение многим наблюдаемым явлениям в кристалловолокне LGBO, в частности, объяснить различия в картине ТСЛ кристалловолокна и монокристалла в области 80 – 300 К, а также объяснить отсутствие (или крайне низкую интенсивность) полосы люминесценции при 3.95 эВ в кристалловолокне.

Выполнение объединенного цикла экспериментальных исследований и расчетов для монокристаллических и кристалловолоконных образцов двойного ортобората лития-гадолиния LGBO:Ce позволило впервые получить значительное количество новых данных о механизмах рекомбинационных процессов, динамике электронных возбуждений и люминесценции. Это создает научные основы как для практических приложений данного оптического материала, так и для дальнейшего исследования процессов формирования дефектов и переноса энергии электронных возбуждений в монокристаллических и кристалловолоконных образцах LGBO:Re.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

*Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:*

1. Ogorodnikov, I.N. A comparative spectroscopic study of photoluminescence in  $\text{Li}_6\text{GdB}_3\text{O}_9:\text{Ce}$  single crystals and crystal-fibers / I.N. Ogorodnikov, D.O. Vostrov, V.A. Pustovarov, I.N. Sedunova // Journal of Luminescence. – 2015. – № 159. – P. 258-264. (0.45 п.л. / 0.3 п.л.).

2. Ogorodnikov, I.N. Cathodoluminescence kinetics of  $\text{Li}_6\text{GdB}_3\text{O}_9$  crystals / I.N. Ogorodnikov, M.S. Kiseleva, D.O. Vostrov, V.Yu. Yakovlev // Journal of Luminescence. – 2015. – № 158. – P. 252-259. (0.5 п.л. / 0.3 п.л.).

3. Ogorodnikov, I.N. Optical and luminescence spectroscopy studies of electronic structure of  $\text{Li}_6\text{GdB}_3\text{O}_9$  single crystals / I.N. Ogorodnikov, V.A. Pustovarov, S.I. Omelkov, D.O. Vostrov, L.I. Isaenko // Optical Materials. – 2014. – № 36. – P. 1060-1064. (0.3 п.л. / 0.2 п.л.).

4. Ogorodnikov, I.N. Thermoluminescence kinetics of  $\text{Li}_6\text{GdB}_3\text{O}_9$  crystals / I.N. Ogorodnikov, D.O. Vostrov, V.A. Pustovarov, I.N. Sedunova // Optical Materials. – 2014. – № 36. – P. 1571-1579. (0.55 п.л. / 0.3 п.л.).

5. Vostrov, D.O. Thermoluminescent and photoluminescent spectroscopy of  $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3\text{Ce}$  crystal-fibers / D.O. Vostrov, I.N. Ogorodnikov, N., V.A. Pustovarov, I.N. Sedunova // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – № 12 (3). – С. 80-84. (0.3 п.л. / 0.2 п.л.).

6. Kiseleva, M.S. Optical and luminescence properties of lithium gadolinium orthoborate crystals / M.S. Kiseleva, I.N. Ogorodnikov, I.N. Sedunova, D.O. Vostrov, V.Yu. Yakovlev // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – № 12 (3). – С. 32-35. (0.25 п.л. / 0.15 п.л.).

7. Vostrov, D.O. Luminescence of  $\text{Li}_6(\text{Gd,Y})(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}$  fibers / D.O. Vostrov, I.N. Sedunova, I.N. Ogorodnikov, V.Yu. Ivanov // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – № 11 (3). – С. 256-260.

*Другие публикации:*

8. Vostrov, D.O. Thermoluminescent and photoluminescent spectroscopy of  $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3\text{Ce}$  crystal-fibers / D.O. Vostrov, I.N. Ogorodnikov, V.A. Pustovarov, I.N.

Sedunova // Abstracts of 4th International Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials; 15th International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter. – 2014. – С. 427. (0.1 п.л. / 0.05 п.л.).

9. Kiseleva, M.S. Optical and luminescence properties of lithium gadolinium orthoborate crystal / M.S. Kiseleva, I.N. Ogorodnikov, I.N. Sedunov, D.O. Vostrov, V.Yu. Yakovlev // Abstracts of 4th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. – 2014. – С. 448. (0.1 п.л. / 0.05 п.л.).

10. Востров, Д.О. Изучение термолюминесцентных и фотолюминесцентных спектров кристалло-волокна  $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}$  / Д.О. Востров, И.Н. Огородников, В.А. Пустоваров, И.Н. Седунова // Тезисы. Первая международная молодежная научная конференция, посвященная 65-летию основания Физико-технологического института. – 2014. – С. 67-68. (0.15 п.л. / 0.10 п.л.).

11. 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. (0.15 п.л. / 0.1 п.л.).

12. Sedunova, I.N. Luminescence properties of  $\text{Li}_6(\text{Gd},\text{Y})(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}$  fibers / I.N. Sedunova, D.O. Vostrov, I.N. Ogorodnikov, V.Yu. Ivanov // Сборник докладов X Иссук-Кульской Международной конференции по радиационной физике SCORPH-2013. – 2013. – С. 147-153. (0.45 п.л. / 0.3 п.л.).

13. Vostrov, D.O. Luminescence of  $\text{Li}_6(\text{Gd},\text{Y})(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}$  fibers / D.O. Vostrov, I.N. Sedunova, I.N. Ogorodnikov, V.Yu. Ivanov // Abstracts of 3rd International Congress on Radiation Physics, High current electronics, and modification of materials. – 2012. – С. 55. (0.1 п.л. / 0.05 п.л.).

---

Подписано в печать

Формат 60x84 1/16

Бумага писчая

02.10.2015

Офсетная печать

Тираж 100 экз.

Заказ № 167

---

Отпечатано в ризографии НИЧ УрФУ

620002, Екатеринбург, ул. Мира 19