

На правах рукописи

Орехова Ксения Николаевна

КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ И КЕРАМИК НА  
ОСНОВЕ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА

1.3.8 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Заморянская Мария Владимировна

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, Мальчукова Евгения Валерьевна

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

кандидат физико-математических наук, Колесников Илья Евгеньевич  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года в \_\_:\_\_ на заседании диссертационного совета 34.01.01

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе и на сайте <http://www.ioffe.ru>.

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, ученому секретарю диссертационного совета ФТИ 34.01.01.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 34.01.01  
PhD

Калашникова А.М.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность

Материалы на основе иттрий-алюминиевого граната (YAG), активированные редкоземельными ионами (РЗИ), находят свое применение в различных областях науки и техники. Монокристаллы на YAG широко используются в качестве рабочего тела твердотельных лазеров видимого и ИК- диапазонов [1, 2].

Оксидные нано- и микрокерамики, активированные РЗИ [3-7], создаются в качестве альтернативы монокристаллам, поскольку имеют ряд преимуществ. По сравнению с технологией монокристаллов, главной трудностью которой являются высокие температуры плавления оксидов РЗИ, керамический подход даёт больше возможностей управления составом матрицы, создания крупногабаритных и градиентно-легированных активных элементов, позволяет улучшить их механические свойства. Основное преимущество керамики перед монокристаллами заключается в менее трудозатратном производстве.

Первые упоминания об успешном синтезе высокопрозрачной лазерной керамики на основе YAG:Nd, не уступающей коммерческим монокристаллам в удельной мощности лазерной генерации приводятся в работе [8]. В дальнейших работах было показано, что для достижения высокой прозрачности керамики необходимо, чтобы толщина межзеренных границ не превышала ~1 нм, и в материале отсутствовали межзеренные поры и примесные фазы [9, 10].

Однако, поскольку в керамиках существует большое число межзеренных границ (интерфейсов), необходимо, помимо прочего, учитывать и исследовать их влияние на оптические свойства. Уровни,

обусловленные наличием межзеренных границ в материале, обычно являются высокоэнергетическими и располагаются внутри запрещенной зоны материала, вблизи зоны проводимости. Запрещенная зона оксидных материалов, из которых синтезируется оптическая керамика, составляет не менее 7 эВ, в связи с чем классическая фотолюминесценция (с энергией возбуждения до 6 эВ) для таких исследований не подходит, и в настоящее время энергетическая структура оксидных керамик исследована недостаточно подробно. Для возбуждения уровней, связанных с интерфейсами в материале, наиболее оптимально использовать высокоэнергетическое возбуждение, например облучение электронным пучком средних энергий (1 – 40 кэВ). Из-за влияния подобных уровней на механизмы люминесценции, возможно как изменение спектральных характеристик поликристаллов, так и проявление новых эффектов, влияющих на их оптические свойства, в т. ч. люминесценцию.

В последние годы наблюдается интерес к материалам на основе YAG в связи с перспективой их применения в качестве сцинтилляторов и детекторов высокоэнергетического излучения [11, 12]. В сцинтилляторах, катодо- и рентгенолюминофорах на основе оксидных материалов, активированных редкоземельными ионами, большую роль играет возбуждение энергетических уровней люминесцентных центров – редкоземельных ионов через зону проводимости с передачей энергии от различных высокоэнергетических уровней (дефектов и пр.). Для уровней ИК-диапазона РЗИ в кристаллах YAG еще несколько десятилетий назад были разработаны каскадные схемы с целью увеличения заселенности лазерного уровня. Каскадные схемы основываются на передаче энергии между ионами разного типа, одни из которых выступают в роли ионов-доноров, а другие – в роли ионов-акцепторов. Исследования передачи

энергии между такими ионами были направлены, в первую очередь, на передачу возбуждения между низкоэнергетическими уровнями, излучающими свет в видимом и ИК-диапазоне [13-15]. Исследование передачи возбуждения между высокоэнергетическими уровнями в подобных материалах недостаточно подробно освещено в современной литературе. Помимо излучающих уровней, в процессах передачи энергии могут играть роль уровни, связанные с дефектами в материале. Эти уровни могут сами не являться излучательными, но при этом они могут служить в качестве дополнительного источника (или стока) энергии, таким образом, увеличивая, (или, соответственно, уменьшая) интенсивность люминесценции излучательных уровней. Исследования механизмов возбуждения и процессов передачи энергии важны при разработке новых схем для перспективных сцинтилляторов, катодо- и рентгенолюминофоров, т. к. это позволит создавать новые материалы с более высоким выходом люминесценции, а также учитывать влияние межзеренных границ и интерфейсов на люминесценцию излучательных уровней.

**Целью диссертационной работы** является исследование особенностей люминесцентных свойств материалов на основе YAG:Nd и YAG:Eu (монокристаллов, микрокерамики и нанокерамики) при высокоэнергетическом возбуждении.

### **Основные задачи работы:**

1. Изучение результатов воздействия электронного пучка на диэлектрические материалы на основе YAG – расчет нагрева образцов, а также исследование механизмов формирования контаминационной пленки на поверхности материалов.

2. Исследование и интерпретация спектров люминесценции монокристаллов и керамик на основе YAG:Nd и YAG:Eu при высокоэнергетическом возбуждении, люминесценция РЗИ и полос собственных дефектов матрицы YAG.

3. Исследование кинетики затухания полос катодолюминесценции монокристаллов и керамик на основе YAG:Nd и YAG:Eu. Связь кинетики затухания с долей интерфейсов (границ зерен, поверхности) в материалах.

4. Исследование процессов захвата и передачи энергии в материалах. Исследование эффективности захвата возбуждения энергетических уровней монокристаллов и керамик на основе YAG:Nd и YAG:Eu.

5. Исследование ловушек носителей заряда в монокристаллах и керамиках на основе YAG:Nd и YAG:Eu. Изучение влияния локализации носителей заряда на люминесцентные свойства материалов.

### **Научная новизна**

1. Выявлен механизм формирования контаминационной пленки на поверхности диэлектрических образцов на основе YAG. Данная плёнка образуется из органических молекул, которые полимеризуются и закрепляются в области действия электронного пучка на поверхности образца. Источником молекул углеводородов могут служить остаточные пары масла в случае использования паромасляного насоса, элементы уплотнения вакуумной системы и поверхностные загрязнения

исследуемых образцов. Изучено влияние пленки на люминесценцию и определен её коэффициент поглощения в оптическом диапазоне.

2. Исследовано влияние интерфейсов в монокристаллах и керамиках на основе YAG на кинетику затухания полос люминесценции Nd и Eu.

3. Определена эффективность захвата возбуждения энергетических уровней Nd и Eu в монокристаллах и керамиках на основе YAG. Для интерпретации полученных в работе результатов предложена трехуровневая модель катодлюминесценции.

4. Изучено влияние локализации носителей заряда на люминесцентные свойства материалов на основе YAG. Разработана модель, описывающая взаимодействие ловушек носителей заряда с излучательными уровнями РЗИ.

### **Научная и практическая значимость работы**

Научная значимость работы состоит в детальном исследовании механизмов преобразования высокоэнергетического излучения в оптическое в монокристаллах и керамиках на основе YAG:Nd и YAG:Eu. В ходе исследований был открыт эффект памяти в нанокерамиках YAG:Nd и YAG:Eu, связанный с заполнением зарядовых ловушек в процессе облучения электронным пучком. Также впервые были детально исследованы механизмы возбуждения энергетического уровня  ${}^5D_0$  Eu $^{3+}$  в монокристалле и нанокерамике на основе YAG:Eu и разработана трехуровневая модель катодлюминесценции, описывающая возбуждение энергетических уровней и включающая процессы передачи возбуждения между уровнями.

Практическая значимость работы состоит в том, что исследуемые материалы имеют большое прикладное значение в современной науке и технике. Исследования люминесценции, приведенные в диссертационной работе, могут быть использованы при разработке каскадных схем уровней видимого оптического диапазона с целью увеличения интенсивности люминесценции при высокоэнергетической накачке.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается их воспроизводимостью при повторно проводимых измерениях и внутренней согласованностью результатов, полученных различными методами исследования.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. В керамиках на основе иттрий-алюминиевого граната присутствуют 2 типа люминесцентных центров – редкоземельных ионов с различными временами затухания интенсивности катодолюминесценции. Центры с более коротким временем затухания интенсивности катодолюминесценции ассоциированы с интерфейсами и границами зерен.
2. Наличие границ зерен в материалах на основе иттрий-алюминиевого граната не влияет на эффективность захвата возбуждения энергетических уровней редкоземельных ионов при облучении электронным пучком.
3. Механизм возбуждения энергетического уровня  ${}^5D_0$   $\text{Eu}^{3+}$  в монокристалле и нанокерамике на основе иттрий-

алюминиевого граната описывается трехуровневой моделью катодолюминесценции. Дополнительный канал возбуждения энергетического уровня  ${}^5D_0$   $\text{Eu}^{3+}$  в исследуемых материалах связан с более высокоэнергетическим уровнем  ${}^5L_6$   $\text{Eu}^{3+}$ .

4. Увеличение интенсивности катодолюминесценции полос Nd и Eu в нанокерамике на основе иттрий-алюминиевого граната при непрерывном облучении электронным пучком связано с заполнением дырочных ловушек. Эффект памяти в материале описывается низкой вероятностью термоактивации заполненных ловушек при комнатной температуре. Наиболее вероятный тип ловушек, отвечающий за эффект памяти в нанокерамике обладает энергией активации в 0,88 эВ.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории диффузии и дефектообразования в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе, на ученом совете Отделения физики диэлектриков и полупроводников ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также на международных школах, конференциях и симпозиумах, в том числе наиболее важных: 8th Laser Ceramics Symposium: International Symposium on Transparent Ceramics for Photonic Applications (2012 г.); XV International Feofilov Symposium on spectroscopy of crystals doped with rare earth and transition metal ions, (2013 г.); 17th International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matters, (2014 г.); 6th International Conference on Excited States of Transitions Elements, (2016 г.); 5th International Conference on RARE EARTH MATERIALS - Advances in Synthesis, Studies and Applications, (2018 г.); 5th International Conference

on the Physics of Optical Materials and Devices, (2018 г.); 8th International Symposium on Optical Materials, (2019 г.); 12th International Conference on Excited States of Transitions Elements, (2019 г.); XVIII International Feofilov Symposium on Spectroscopy of Crystals Doped with Rare Earth and Transition Metal Ions, (2022 г.).

Также результаты работы были дважды отмечены третьей премией для молодых ученых ФТИ им. А.Ф. Иоффе (2017, 2021 г.).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 11 работ в журналах, индексируемых в базах данных WoS и Scopus, всего опубликовано 23 работы. Список публикаций приведен в конце автореферата.

### **Личный вклад**

Личный вклад автора заключается в том, что диссертант принимал непосредственное участие в постановке и решении задач, проведении экспериментальных исследований, обработке и обсуждении полученных результатов. Подавляющее большинство представленных в диссертации результатов моделирования, экспериментальных результатов и теоретических описаний получены автором лично.

Получение изображений сканирующей электронной микроскопии и дифракции обратно-отражённых электронов проводились к.ф.-м.н. А. А. Кудрявцевым в демонстрационной лаборатории «TESCAN» (Санкт-Петербург), АСМ изображений – П.А. Дементьевым в ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург). Исследования методом РДФА – М.А. Яговкиной в ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург) и PhD. R. Tomala в Институте низких температур и структурных исследований ПАН

(Вроцлав, Польша), спектров возбуждения - к.х.н. В.В. Уточниковой в МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, благодарностей, списка сокращений, списка литературы и одного приложения. Работа содержит 128 страниц машинописного текста, включая 66 рисунков, 13 таблиц и библиографию из 160 наименований.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследований, изложена новизна и практическая ценность работы, сформулированы основные защищаемые положения.

**В первой главе** представлен обзор современных исследований монокристаллов и керамик на основе YAG – описаны основные дефекты матрицы и их люминесценция, описаны свойства РЗИ, как активаторов в широкозонных материалах, и представлен обзор люминесцентных свойств материалов на основе YAG:Nd и YAG:Eu. Также в главе приведено описание взаимодействия электронного пучка с твердым телом, в частности, приведена подробная схема релаксации электронных возбуждений в твердом теле.

**Во второй главе** описаны основные методы исследования и методики, применявшиеся в ходе работы над диссертацией. В частности, приведены расчеты распределения потерь энергии электронов при различных энергиях электронного пучка (Рис. 1).

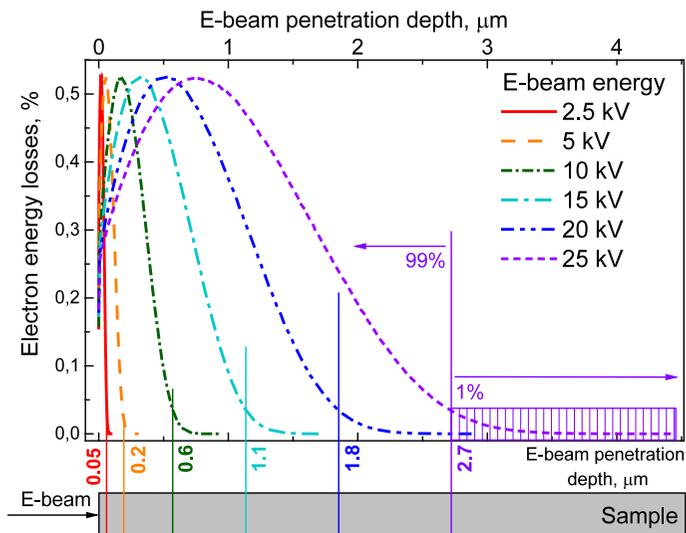


Рис. 1. Распределение потерь энергии электронов по глубине проникновения электронного пучка при различных энергиях в YAG. Цифры у нижней оси указывают глубину проникновения электронного пучка, при которой теряется 99% энергии электронов.

Также в главе приведено описание результатов взаимодействия электронного пучка с YAG – приведено моделирование нагрева образцов при облучении электронным пучком, описание механизмов формирования контаминационной пленки и её влияния на экспериментальные результаты (Рис. 2).

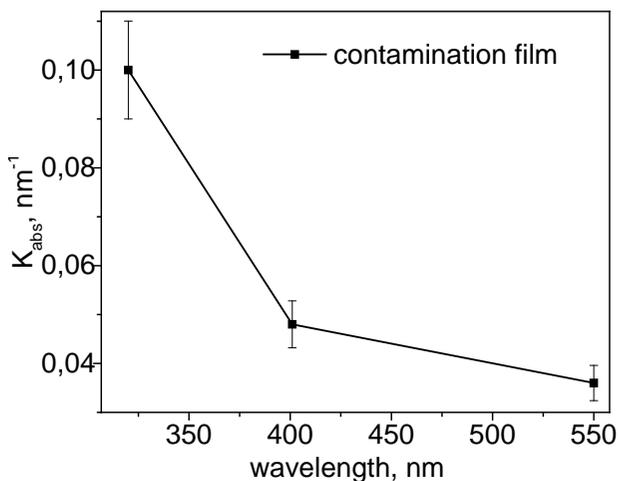


Рис. 2. Коэффициент поглощения контаминационной плёнки, формирующейся под электронным пучком в процессе облучения образцов YAG.

Представлены модели катодолюминесценции (двух- и трехуровневая модель), математически описывающие процессы возбуждения и последующей релаксации локализованных энергетических уровней. Также в главе описана методика исследования влияния локализации носителей заряда на люминесцентные свойства материалов на основе YAG, основанная на исследованиях динамики интенсивности полос КЛ и поглощенного тока при стационарном облучении материалов электронным пучком.

**В третьей главе** приведено описание исследуемых образцов и их характеристика методами рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), рентгенодифракционного фазового анализа (РДФА), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и дифракции обратноотраженных электронов (ДОЭ). Приведены методы синтеза исследуемых образцов монокристаллов, микро- и нанокерамик YAG:Nd и

YAG:Eu. Методом РСМА исследован элементный состав образцов и однородность распределения активатора. Однородность распределения активатора также продемонстрирована на изображениях катодолюминесценции (КЛ) образцов в широком электронном пучке. Методом РФА исследован фазовый состав образцов, а на основании методов СЭМ и ДОЭ определен средний размер зерен в керамиках.

**В четвертой главе** представлены экспериментальные исследования КЛ свойств монокристаллов и керамик на основе YAG. Приведены результаты исследования собственной люминесценции матрицы YAG. Показано, что УФ люминесценция всех образцов представляет собой суперпозицию трех широких полос. Основной вклад в УФ люминесценцию всех образцов вносит полоса с максимумом 3,7-3,8 эВ. Из литературных данных известно, что эта полоса связана с люминесценцией дефектов перестановки  $Y^{Al}_{oct}$  (антиузельные дефекты, antisite defects) – ионы Y вместо додокаэдрической позиции занимают октаэдрическую позицию ионов Al.

Представлены и интерпретированы спектры КЛ монокристаллов и керамик (Рис. 3), в т.ч. полосы КЛ видимого и УФ-диапазона. Исследована кинетика затухания полос КЛ Nd и Eu в образцах при различных значениях энергии электронного пучка, определяющей глубину проникновения первичных электронов в образец, и, соответственно, глубину генерации КЛ. Кинетика затухания полос КЛ описывается моноэкспоненциальным выражением:

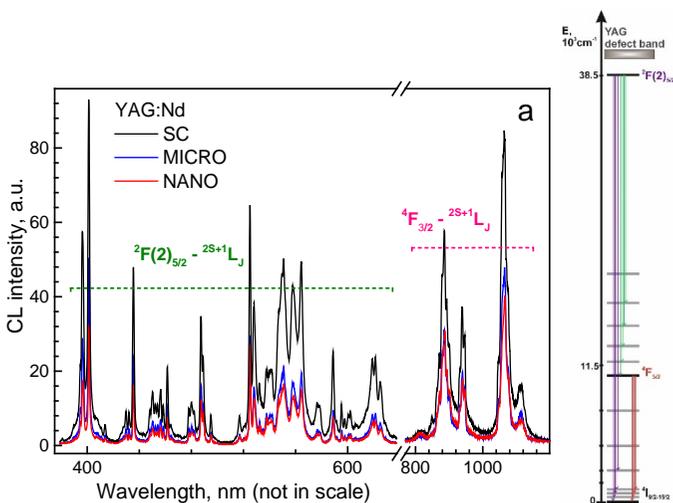
$$I \propto n_1 \tau_1^{-1} = n_{10} \tau_1^{-1} \exp(-\tau^{-1}t) \quad (1),$$

где  $I$  – интенсивность КЛ,  $n_1$  – количество возбужденных центров,  $n_{10}$  – заселенность возбужденного уровня в момент прекращения

возбуждения,  $\tau$  – время жизни излучательного уровня (время затухания),  $t$  – время.

Однако, в случае, когда несколько независимых центров люминесценции с разным временем жизни дают вклад в КЛ на одной длине волны, то интенсивность КЛ пропорциональна сумме возбужденных центров люминесценции и их вероятностям затухания, и описывается суммой экспоненциальных функций:

$$I \propto n_1 \tau_1^{-1} + n_2 \tau_2^{-1} = N_1 \tau_1^{-1} \exp\{-\tau_1^{-1}t\} + N_2 \tau_2^{-1} \exp\{-\tau_2^{-1}t\} \quad (2)$$



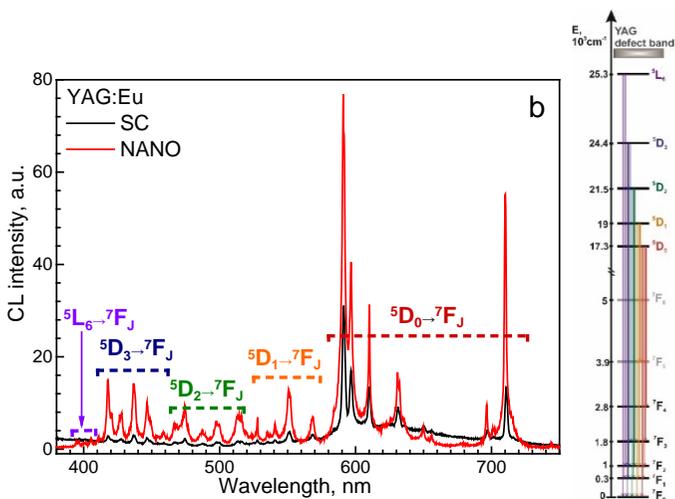


Рис. 3. КЛ спектры образцов (слева) а) YAG:Nd и б) YAG:Eu и их интерпретация согласно схемам энергетических уровней РЗИ (справа).

Было определено, что кинетика затухания полос КЛ в керамиках имеет двухэкспоненциальный характер при любом значении энергии электронного пучка, тогда как в монокристаллах – только при низких значениях энергии пучка. Соотношение вкладов двух компонент затухания представлено на Рис. 4. Более короткая компонента затухания связывается с типом люминесцентных ионов, находящихся вблизи дефектов (границ зерен в керамиках, приповерхностном слое в монокристаллах). Эти дефекты в таком случае служат дополнительным каналом безызлучательной рекомбинации близкорасположенных ионов активатора.

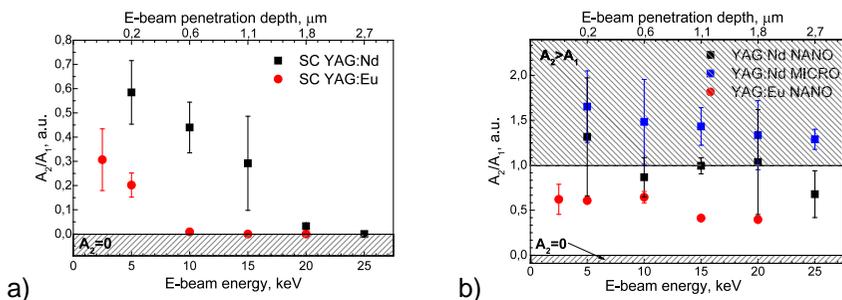


Рис. 4. Зависимость отношения вклада короткого времени затухания к длинному ( $A_2/A_1$ ) от энергии электронного пучка в образцах а) монокристаллов; б) керамики.

Исследована кинетика разгорания полос КЛ Nd и Eu в монокристаллах и керамиках YAG. В момент включения электронного пучка, то есть в момент разгорания КЛ, интенсивность КЛ зависит от времени следующим образом:

$$I \propto \frac{LJN\tau^{-1}}{LJ+\tau^{-1}}(1 - \exp\{-(LJ + \tau^{-1})t\}) \quad (3),$$

где  $N$  – полная концентрация излучательных центров в материале,  $J$  – плотность тока на единицу возбуждаемого объема,  $\tau$  – время разгорания КЛ,  $t$  – время, а  $L$  – коэффициент эффективности, с которой невозбужденные центры переходят в возбужденное состояние (эффективность захвата возбуждения). Коэффициент  $L$  зависит только от конкретного излучательного уровня и материала, он определяется скоростью возбуждения центров люминесценции за единицу времени при облучении образца током электронов с единичной объемной плотностью. Эффективность захвата возбуждения можно определить на основании зависимости скорости разгорания полос КЛ от плотности тока.

Было показано, что эффективность захвата возбуждения в монокристаллах и керамиках YAG совпадает с учетом погрешности измерений. Кинетика разгорания уровня  ${}^5D_0$  в монокристалле и нанокерамике на основе YAG:Eu указывает на дополнительный источник возбуждения уровня (Рис. 5).

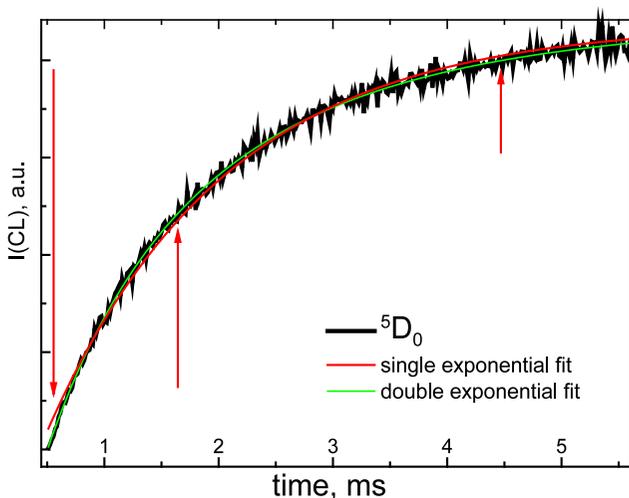


Рис. 5. Кинетика разгорания уровня  ${}^5D_0$   $\text{Eu}^{3+}$  в монокристалле и нанокерамике на основе YAG.

Исследованы спектры возбуждения уровней  ${}^5D_1$  и  ${}^5D_0$  в нанокерамике на основе YAG:Eu. Показано, что дополнительным каналом возбуждения уровня  ${}^5D_0$  служит уровень  $\text{Eu } {}^5L_6$ , энергия которого близка к энергии излучения полосы собственных дефектов YAG, о чем говорит наложение этих полос в спектре КЛ. Предложена трехуровневая модель КЛ, описывающая дополнительный захват возбуждения уровнем  ${}^5D_0$   $\text{Eu}^{3+}$ .

**В пятой главе** приведены исследования влияния локализации носителей заряда на люминесцентные свойства материалов на основе

YAG. Исследование динамики поглощенного тока одновременно с КЛ в кристаллах и керамиках при непрерывном облучении электронным пучком показало, что в монокристаллах и микрокерамике на основе YAG присутствуют электронные ловушки с характерным временем заполнения в десятки секунд. Заполнение электронных ловушек приводит к увеличению поглощенного тока и уменьшению интенсивности КЛ. В нанокерамиках на основе YAG присутствуют два типа ловушек – как электронные, с характерным временем заполнения в десятки секунд, так и дырочные, с характерным временем заполнения в сотни секунд. В процессе облучения электронным пучком заполнение дырочных ловушек приводит к уменьшению поглощенного тока и увеличению интенсивности КЛ. На основании полученных данных предложена модель, описывающая взаимодействие ловушек носителей заряда с излучательными уровнями РЗИ. Методом термолюминесценции определены параметры ловушек в нанокерамике на основе YAG:Nd.

В разделе **«Заключение»** сформулированы основные результаты и выводы:

1. Исследование образцов монокристалла, микрокерамики и нанокерамики на основе YAG:Nd, и монокристалла и нанокерамики на основе YAG:Eu показало, что размер зерен микрокерамики составлял от единиц до десятков мкм., а нанокерамик – 50 нм.

2. Моделирование температуры локального нагрева образцов в процессе облучения электронным пучком выявило, что при стандартных условиях эксперимента нагрев не превышает 40 °С. Время установления температуры нагрева оценено, как единицы мкс.

3. Исследование механизма формирования контаминационной пленки на поверхности образцов показало, что доминирующим

механизмом в образовании контаминационной пленки служит поверхностная диффузия молекул углеводородов к облучаемой области, а определяющим фактором в механизме её формирования является не только площадь экспонируемой поверхности, но и плотность тока электронного пучка.

4. Оценена глубина области генерации КЛ при различных значениях электронного пучка. При условиях экспериментов, представленных в работе, она составляет от 50 нм до 2,7 мкм.

5. Исследование КЛ собственных дефектов матрицы YAG показало, что УФ люминесценция всех исследуемых образцов представляет собой суперпозицию трех широких полос, связанных с люминесценцией антиузельных дефектов типа  $Y_{\text{окт}}^{\text{Al}}$ .

6. Получены и интерпретированы спектры КЛ  $\text{Nd}^{3+}$  и  $\text{Eu}^{3+}$  в монокристаллах и керамиках YAG. В видимой (YAG:Eu, YAG:Nd) и УФ (YAG:Nd) областях спектров наблюдаются переходы с высокоэнергетических уровней, не наблюдаемые при фотовозбуждении. Показано, что интенсивность полос КЛ в образцах с близким содержанием активатора в керамиках ниже, чем в монокристаллах, а их полуширина – больше.

7. При исследовании кинетики затухания полос КЛ  $\text{Eu}^{3+}$  и  $\text{Nd}^{3+}$  в образцах было выявлено, что в случае присутствия большой доли интерфейсов в области генерации КЛ (в приповерхностной области в монокристаллах и по всему объему в керамиках) кинетика затухания описывается суммой двух экспонент. По результатам исследования соотношения вкладов экспонент от энергии электронного пучка показано, что люминесцентные центры, расположенные вблизи границ зерен в керамике характеризуются меньшим временем затухания.

8. Исследование зависимости скорости разгорания интенсивности КЛ, вызванной переходами между различными энергетическими уровнями  $\text{Eu}^{3+}$  и  $\text{Nd}^{3+}$ , в образцах показало, что эффективность захвата возбуждения в монокристаллах и керамиках YAG совпадает с учетом погрешности измерений.

9. При исследовании кинетики разгорания интенсивности полос КЛ  $\text{Eu}^{3+}$  и  $\text{Nd}^{3+}$  в образцах было обнаружено, что кинетика разгорания полос КЛ, отвечающих переходам с энергетического уровня  $^5\text{D}_0$   $\text{Eu}^{3+}$ , как в монокристалле, так и в нанокерамике YAG, описывается суммой двух экспонент. Предложена трехуровневая модель КЛ, которая объясняет дополнительный канал возбуждения уровня  $^5\text{D}_0$   $\text{Eu}^{3+}$ .

10. Изучено влияние локализации носителей заряда на люминесцентные свойства материалов на основе YAG. Показано, что в монокристаллах YAG:Nd и YAG:Eu и микрокерамике на YAG:Nd присутствуют зарядовые ловушки электронного типа, которые заполняются в процессе облучения электронным пучком, что увеличивает поглощенный ток и одновременно снижет интенсивность КЛ излучающих центров. В нанокерамиках на основе YAG:Nd и YAG:Eu присутствуют два типа ловушек – как электронные ловушки с тем же характерным временем заполнения, что и в монокристаллах, так и дырочные ловушки, с характерным временем заполнения в сотни секунд. Эти ловушки отвечают за эффект памяти в нанокерамиках. Термолюминесцентным методом определены основные параметры ловушек в нанокерамике на основе YAG:Nd. Предложена модель, описывающая взаимодействие ловушек носителей заряда с излучательными уровнями РЗИ.

**Список публикаций по теме диссертации. Публикации в журналах, индексируемых в WoS и Scopus:**

I. **Гуляева К. Н.**, Трофимов А. Н., Заморянская М. В. ИССЛЕДОВАНИЕ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК YAG:ND<sup>3+</sup> //Оптика и спектроскопия. – 2013. – Т. 114. – №. 5. – С. 773-773.

Перевод: **Gulyaeva K. N.**, Trofimov A. N., Zamoryanskaya M. V. A study of cathodoluminescent characteristics of YAG: Nd<sup>3+</sup> //Optics and Spectroscopy. – 2013. – Т. 114. – №. 5. – С. 709-712.

II. **Орехова К. Н.** и др. эффект памяти и Катодолюминесцентные свойства нанокерамики на основе YAG: Nd<sup>3+</sup> //Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 120. – №. 6. – С. 956-962.

Перевод: **Orekhova K. N.** et al. Memory effect and cathodoluminescent properties of YAG: Nd<sup>3+</sup> nanoceramics //Optics and Spectroscopy. – 2016. – Т. 120. – №. 6. – С. 896-901.

III. **Orekhova K. N.** et al. Cathodoluminescence of YAG: Nd optical nanoceramics in the visible and UV ranges //Optical Materials. – 2017. – Т. 74. – С. 170-175.

IV. Кравец В. А. и др. Eu<sup>3+</sup> как люминесцентный зонд для исследования структуры R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-материалов (R---Y, Eu и Gd) //Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 125. – №. 2. – С. 180-186.

Перевод: Kravets V. A. et al. Eu<sup>3+</sup> as a luminescent probe for studying the structure of R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> materials (R= Y, Eu, and Gd) //Optics and Spectroscopy. – 2018. – Т. 125. – №. 2. – С. 188-194.

V. **Орехова К. Н.** и др. Исследование контаминационной пленки, формирующейся под действием электронного пучка //Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – №. 9. – С. 1412-1419.

Перевод: **Orekhova K. N.** et al. Investigation of a contamination film formed by the electron beam irradiation //Technical Physics. – 2019. – Т. 64. – №. 9. – С. 1336-1342.

VI. Ivanova E. V. et al. Properties of  $\text{Eu}^{3+}$ -doped zirconia ceramics synthesized under spherical shock waves and vacuum annealing //Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Т. 808. – С. 151778.

VII. Gusev G. A. et al. Kinetic properties of YAG:  $\text{Eu}^{3+}$  emission upon electron beam excitation //Journal of Luminescence. – 2020. – Т. 222. – С. 117084.

VIII. **Orekhova K.**, Tomala R., Zamoryanskaya M. The study of composition, structure and cathodoluminescent features of YAG: $\text{Eu}^{3+}$  nanoceramics. Excitation capture efficiency of  $\text{Eu}^{3+}$  energy levels //Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – Т. 858. – С. 157731.

IX. Zamoryanskaya M. V. et al. Self-glowing crystals–radioactive decay energy converters into optical emission //Materials Research Bulletin. – 2021. – Т. 142. – С. 111431.

X. Zamoryanskaya M. V. et al. Excitation capture efficiency of rare-earth ions emission levels upon electron-beam irradiation //Journal of Luminescence. – 2021. – Т. 239. – С. 118350.

XI. **Orekhova K.**, Zamoryanskaya M. Decay kinetics in single crystals and ceramics based on yttrium aluminum garnet doped with rare earth ions //Journal of Luminescence. – 2022. – Т. 251. – С. 119228.

## **Список литературы**

1. Payne S. A., Albrecht G. F. Lasers, Solid-State. – 2003.
2. Каминский А. А. Лазерные кристаллы. Наука, М. – 1975.
3. Tomala R. et al. Comprehensive study of photoluminescence and cathodoluminescence of YAG: Eu<sup>3+</sup> nano-and microceramics //Optical Materials. – 2015. – Т. 50. – С. 59-64.
4. Kaminskii A. A. et al. High quality Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> doped transparent ceramics for laser applications, role of sintering additives //Optical Materials. – 2017. – Т. 71. – С. 103-108.
5. Pokhrel M. et al. Comparative studies of the spectroscopic properties of Nd<sup>3+</sup>: YAG nanocrystals, transparent ceramic and single crystal //Optical Materials Express. – 2012. – Т. 2. – №. 3. – С. 235-249.
6. Zhou J. et al. Optical properties of Er, Yb co-doped YAG transparent ceramics //Ceramics International. – 2011. – Т. 37. – №. 2. – С. 513-519.
7. Vorona I. O. et al. 1532 nm sensitized luminescence and up-conversion in Yb, Er: YAG transparent ceramics //Optical Materials. – 2018. – Т. 77. – С. 221-225.
8. Ikesue A. et al. Fabrication and optical properties of high-performance polycrystalline Nd: YAG ceramics for solid-state lasers //Journal of the American Ceramic Society. – 1995. – Т. 78. – №. 4. – С. 1033-1040.
9. Ikesue A. et al. Progress in ceramic lasers //Annual Review of Materials Research. – 2006. – Т. 36. – №. 1. – С. 397-429.
10. Kochawattana S. et al. Sintering and grain growth in SiO<sub>2</sub> doped Nd: YAG //Journal of the European Ceramic Society. – 2008. – Т. 28. – №. 7. – С. 1527-1534.

11. Danevich F. A. et al. YAG: Nd crystals as possible detector to search for double beta and alpha decay of neodymium //arXiv preprint nucl-ex/0410021. – 2004.
12. Borghesani A. F. et al. Cathodo-and radioluminescence of Tm<sup>3+</sup>: YAG and Nd<sup>3+</sup>: YAG in an extended wavelength range //Journal of Luminescence. – 2017. – T. 190. – C. 29-36.
13. Rothacher T., Lüthy W., Weber H. P. Diode pumping and laser properties of Yb: Ho: YAG //Optics communications. – 1998. – T. 155. – №. 1-3. – C. 68-72.
14. Samuel P. et al. Efficient energy transfer between Ce<sup>3+</sup> and Nd<sup>3+</sup> in cerium codoped Nd: YAG laser quality transparent ceramics //Journal of alloys and compounds. – 2010. – T. 507. – №. 2. – C. 475-478.
15. Kvapil J. et al. Luminescence sensitization in Nd-Cr-Ce doped yttrium aluminates //Czechoslovak Journal of Physics B. – 1987. – T. 37. – №. 11. – C. 1277-1287.