

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

на правах рукописи

Гусев Григорий Андреевич

**Люминесцентные и структурные свойства тантало-ниобатов гадолиния,  
активированных  $\text{Eu}^{3+}$  и  $\text{Tb}^{3+}$**

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:

**Заморянская Мария Владимировна**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, зав. лабораторией Диффузии и дефектообразования в полупроводниках, главный научный сотрудник

Официальные оппоненты:

**Сидоров Николай Васильевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», главный научный сотрудник

**Кулинкин Алексей Борисович**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, старший научный сотрудник

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

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, [www.ioffe.ru](http://www.ioffe.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
ФТИ 34.01.01,  
PhD

Калашникова А. М.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы:

Разработка новых функциональных материалов на основе широкозонных оксидов, а также методов их синтеза остается важной прикладной задачей. Такие материалы используются в качестве рабочих тел лазеров, термостойких покрытий, преобразователей высокоэнергетического излучения в излучение оптического диапазона (сцинтилляторов), люминофоров и т.п. В свою очередь, сцинтилляторы и люминофоры широко применяются в промышленности (дозиметрия), науке, медицине и геологии [1, 2].

Среди перспективных оксидных материалов особое внимание заслуживают ниобаты и танталаты редкоземельных элементов ( $\text{LnNbO}_4$  и  $\text{LnTaO}_4$ ).  $\text{LnNbO}_4$  и  $\text{LnTaO}_4$  обладают высокой механической, радиационной, химической стойкостью и перспективными люминесцентными свойствами [3]. Их отличительной особенностью является наличие собственной полосы люминесценции, которая связана с группами  $\text{NbO}_4^{3-}$  или  $\text{TaO}_4^{3-}$  [4, 5]. Эти группы могут действовать как сенсibilизаторы люминесцентных центров, таких как редкоземельные ионы (РЗИ) [6]. Кроме того, танталаты редких земель обладают одним из самых больших значений среднего атомного номера среди сцинтилляторов [7]. Эта характеристика важна для увеличения поглощения высокоэнергетического излучения. Чем она больше, тем лучше вещество способно поглощать такое излучение. Ниобаты и танталаты гадолиния интересны тем, что гадолиний в составе данных веществ выступает активным переносчиком возбуждения к излучательным центрам [8].

Совмещение ниобия и тантала в твердых растворах тантало-ниобатов может дать материал с особыми свойствами [9-10]. Таким твердым растворам посвящено ограниченное количество исследований. Танталаты и ниобаты гадолиния, активированные ионами редкоземельных элементов, изучались в ряде работ [11, 12]. Однако активация твердых растворов тантало-ниобатов гадолиния редкоземельными ионами в литературе практически не представлена. Их люминесцентные и структурные свойства не исследованы.

Помимо создания перспективного функционального материала не менее важным является ряд фундаментальных задач. При разработке новых сцинтилляторов и люминофоров, в особенности активированных РЗИ, актуальными вопросами являются механизмы преобразования высокоэнергетического возбуждения в оптическое излучение. Большинство работ, посвященных изучению этого преобразования, связано с измерением выхода люминесценции в твердых, жидких и газообразных сцинтилляторах при различных способах возбуждения [13-15]. Как правило, авторы измеряют выход люминесценции, не описывая механизмы возбуждения люминесцентных центров или используя феноменологические схемы. Единой модели,

описывающей механизм преобразования высокоэнергетического возбуждения в оптическое излучение, в настоящий момент не существует. Это связано, в первую очередь, с тем, что при возбуждении широкозонного материала энергией, превышающей ширину запрещенной зоны, механизмы релаксации возбуждения определяются не только электронным строением самого материала, но и его особенностями, связанными с существованием собственных дефектов, а также расположением возбужденных энергетических уровней активаторов по отношению к дну зоны проводимости и положению уровня Ферми. В данных процессах существенную роль играют высокоэнергетические уровни активаторов – центров люминесценции. Несмотря на то, что они характеризуются слабой интенсивностью в спектре излучения, они могут выполнять роль доноров энергии для более низкоэнергетических уровней этого же активатора [16].

Хорошо известно, что локальная симметрия редкоземельного иона определяет структуру его спектра излучения. Во многих случаях это свойство, в первую очередь трехвалентного иона европия, используется для исследования локальной симметрии различных материалов [17]. Однако в основном эти исследования связаны с люминесценцией наиболее интенсивных переходов с излучательного уровня  $^5D_0$ . Информация по структуре спектров РЗИ для высокоэнергетических переходов ограничена.

Комплексное исследование структуры полос люминесценции, влияние на нее структурных свойств материала; изучение концентрационных зависимостей и вероятностей возбуждения различных уровней активаторов для тантало-ниобатов ранее не проводилось. Решение этих задач является актуальным в связи со значительным влиянием описанных явлений на конечный выход оптического излучения для широкозонных материалов, активированных редкоземельными ионами при высокоэнергетическом возбуждении.

**Целью** настоящей работы является синтез и исследование люминесцентных и структурных свойств тантало-ниобатов гадолиния, активированных трехвалентными ионами европия и/или тербия.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1) Оптимизировать схему получения тантало-ниобатов гадолиния (неактивированных и активированных РЗИ) методом соосаждения с последующей прокалкой. Получить серии твердых растворов  $GdNb_yTa_{1-y}O_4$ ,  $(Gd_{1-z}Tb_z)Nb_yTa_{1-y}O_4$ ,  $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$ ,  $(Gd_{1-x-z}Eu_xTb_z)Nb_yTa_{1-y}O_4$  ( $x, y, z=0\div 1$ );

2) Провести комплексное исследование элементного и фазового составов, структурных параметров, однородности распределения элементов для полученных образцов тантало-ниобатов гадолиния;

3) Исследовать люминесцентные свойства полученных тантало-ниобатов гадолиния методами катодо- и фотолюминесценции. Определить оптимальное соотношение Nb/Ta и концентрации активаторов для максимальной интенсивности люминесценции. Исследовать тонкую структуру спектров люминесценции  $\text{Eu}^{3+}$  серии  $(\text{Gd}_{1-x}\text{Eu}_x)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$  в зависимости от соотношения Nb/Ta;

4) Исследовать кинетику затухания различных полос люминесценции, связанных с РЗИ, в тантало-ниобатах гадолиния;

5) Исследовать эффективность захвата высокоэнергетического возбуждения различными излучательными уровнями  $\text{Eu}^{3+}$  и  $\text{Tb}^{3+}$ ;

6) Получить и интерпретировать спектры возбуждения образцов тантало-ниобатов гадолиния, активированных РЗИ. Предложить схемы передачи энергии возбуждения в материалах различных синтезированных серий;

7) Исследовать передачу энергии возбуждения к тербию и европию, взаимодействие между этими ионами в серии  $(\text{Gd}_{1-x-z}\text{Eu}_x\text{Tb}_z)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$ .

#### **Научная новизна:**

1) Впервые порошки тантало-ниобатов гадолиния были получены оптимизированным методом соосаждения с последующей прокалкой. Впервые были синтезированы порошки тантало-ниобатов гадолиния, активированных РЗИ ( $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$  и  $\text{Eu}^{3+}+\text{Tb}^{3+}$ ), и получена керамика на их основе.

2) Впервые подробно изучены структурные свойства тантало-ниобатов гадолиния, активированных РЗИ ( $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$  и  $\text{Eu}^{3+}+\text{Tb}^{3+}$ ). Получены концентрационные зависимости параметров моноклинной решетки от соотношения Nb/Ta и содержания активатора.

3) Впервые детально исследованы фото- и катодолюминесцентные свойства тантало-ниобатов гадолиния, активированных РЗИ ( $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$  и  $\text{Eu}^{3+}+\text{Tb}^{3+}$ ). Изучены зависимости интенсивности люминесценции и времен затухания излучательных переходов активатора от содержания активатора и соотношения Nb/Ta в образце. Показана зависимость штарковского расщепления излучательных полос  $\text{Eu}^{3+}$  от структурных параметров материала. Подтверждено влияние границ кристаллитов, составляющих керамику, на времена затухания полос излучения РЗИ.

4) Впервые определены эффективности захвата возбуждения излучательных уровней  $\text{Eu}^{3+}$  и  $\text{Tb}^{3+}$  в тантало-ниобатах гадолиния. Исследованы спектры возбуждения для этих материалов и предложены схемы передачи энергии в них. В том числе, впервые исследован процесс передачи энергии

возбуждения к европию и тербию, а также взаимодействие между этими ионами в  $(\text{Gd}_{1-x-z}\text{Eu}_x\text{Tb}_z)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$ .

### **Практическая значимость:**

Тантало-ниобат гадолиния – перспективный люминесцирующий материал в связи с его высокой химической, механической, радиационной стойкостью и высокой способностью к поглощению ионизирующего излучения. Активация этого вещества РЗИ позволяет получить материал, ярко светящийся под действием высокоэнергетического возбуждения. Такой материал может широко использоваться в качестве порошкообразного люминофора или керамического сцинтиллятора в таких областях, как медицина, геология, наука (основной элемент детекторов высокоэнергетического излучения).

Оптимизированная схема синтеза позволяет получать тантало-ниобаты гадолиния более дешевым способом, по сравнению с аналогичными методами. Максимальные используемые при синтезе температуры находятся в диапазоне 1200-1400 °С, а среднее время спекания керамики не превышает 4 часов.

Исследования влияния структурных параметров на спектры люминесценции, в том числе изучение высокоэнергетических переходов, оценка эффективности захвата высокоэнергетического возбуждения излучательными уровнями, позволяют лучше понять механизмы преобразования высокоэнергетического излучения в оптическое, что является очень важным при разработке эффективных сцинтилляторов, гамма- и рентгенолюминофоров.

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

1) Величина штарковского расщепления уровней  $\text{Eu}^{3+}$  в ряду от ниобата к танталату гадолиния в твердых растворах  $(\text{Gd}_{0.94}\text{Eu}_{0.06})\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$  возрастает. Это связано с уменьшением объема элементарной ячейки, которое приводит к увеличению локального поля, действующего на ионы  $\text{Eu}^{3+}$ .

2) Эффективность захвата возбуждения уровня  $^5\text{D}_0$   $\text{Eu}^{3+}$  в танталате гадолиния выше, чем в твердых растворах, содержащих ниобий. Это связано с тем, что каналы возбуждения уровня  $^5\text{D}_0$  в этих материалах различны. В танталатах гадолиния существенную роль играют возбужденные уровни энергии, относящиеся к  $\text{Gd}^{3+}$ .

3) В тантало-ниобатах гадолиния, активированных  $\text{Eu}^{3+}$  и  $\text{Tb}^{3+}$ , независимо от соотношения Nb/Ta, наблюдается как передача энергии от ионов  $\text{Tb}^{3+}$  к ионам  $\text{Eu}^{3+}$ , так и обратный процесс – передача энергии от ионов  $\text{Eu}^{3+}$  к ионам  $\text{Tb}^{3+}$ .

### **Апробация работы:**

Результаты, относящиеся к данной диссертации, были представлены на семинарах лаборатории диффузии и дефектообразования в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также на следующих российских и международных конференциях:

1) 8th International Symposium on Optical Materials (IS-OM8) 2019, Poland, Wroclaw, June 9-14 2019;

2) Международная конференция Физика.СПб, Санкт-Петербург, 22-24 октября 2019 г.;

3) XLVIII «Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербург, 18-23 ноября 2019 г.;

4) Международная конференция Физика.СПб, Санкт-Петербург, 19-23 октября 2020 г.;

5) «Неделя науки ИФНиТ 2020», Санкт-Петербург, 16-20 ноября 2020 г.;

6) Международная конференция Физика.СПб, Санкт-Петербург, 18-22 октября 2021 г.;

7) Объединённая конференция «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике» (КЭЛТ 2021), Черногловка, 13-17 сентября 2021 г.;

8) Научно-практическая конференция «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение» (РедМет-2021), Москва, 9-10 декабря 2021 г.;

9) XVIII Международный Феофиловский симпозиум по спектроскопии кристаллов, активированных ионами редкоземельных и переходных металлов (IFS-2022), Москва, 22-27 августа 2022 г.;

10) IV Всероссийская научная конференция с международным участием «Исследования и разработки в области химии и технологии функциональных материалов», Апатиты, 17-21 апреля 2023 г.

Результаты были получены в том числе в рамках реализации двух грантов РФФИ (мол\_нр №19-33-50149 и Аспиранты №20-32-90088) и гранта «УМНИК» 2019.

Кроме того, результаты работы были неоднократно отмечены грантами Комитета по науке и высшей школе правительства Санкт-Петербурга, такими как: Грант для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга 2019, 2020 и 2022 гг.; Субсидия физическим лицам в возрасте до 35 лет, являющимся молодыми

учеными (за исключением студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга), молодыми кандидатами наук вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга 2022 г. Также диссертант являлся лауреатом стипендии правительства РФ (по приоритетным направлениям) 2020-2021 гг.

**Достоверность** полученных результатов обуславливается применением современных экспериментальных методов измерений с использованием высокоточного оборудования, достоверных методов обработки данных. Полученные данные согласуются с литературными источниками и воспроизводимы с большой точностью.

**Личный вклад** диссертанта заключается в непосредственном участии в постановке и решении задач; оптимизации схемы синтеза тантало-ниобатов гадолиния; выполнении пробоподготовки; проведении экспериментальных исследований; обработке, обсуждении и публикации полученных результатов. Экспериментальные данные, связанные со спектрами катодолюминесценции, кинетическими измерениями люминесценции, исследованиями эффективности захвата различными излучательными уровнями РЗИ, получены автором лично.

Постановка задач, обсуждение результатов и подготовка публикаций проводились совместно с научным руководителем Загорянской М.В.

Оптимизация метода синтеза проведена совместно с сотрудниками Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева под руководством Маслбоевой С.М.

Экспериментальное исследование структурных свойств проведено на оборудовании Центра коллективного пользования «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» ФТИ им. А.Ф. Иоффе Яговкиной М.А.

Исследования образцов методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) выполнены на оборудовании того же ЦКП Нащекиным А.В.

Экспериментальные данные рентгеноспектрального микроанализа получены совместно с Поповой Т.Б. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе).

Фотолюминесцентные экспериментальные данные получены Васильевым Е.А. (ЦКП Горного Университета) и Кравцом В.А. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе).

Измерения образцов  $ZrY_2O_7:Eu^{3+}, Tb^{3+}$  проводились совместно с Шакировой А.А. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе).



### Публикации:

Основные результаты исследований, представленные в диссертации, изложены в 10 работах, индексируемых в WoS, Scopus и РИНЦ. Четыре работы входят в состав журналов первого или второго квартиля, в двух из которых соискатель является первым и ключевым автором. По материалам работы было опубликовано 10 тезисов конференций. Список работ приведен в конце диссертации.

### Объем и структура диссертации:

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 129 страниц, включающих 61 рисунок и 12 таблиц. Список литературы содержит 124 наименования. Формулы, рисунки и таблицы в диссертации нумеруются по главам, нумерация литературы сквозная.

### **Основное содержание работы**

Во **введении** дана актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, показана апробация и достоверность результатов, описан личный вклад диссертанта.

В **первой главе** представлен обзор литературы по теме диссертации. Описано современное состояние в области исследования танталатов, ниобатов редкоземельных элементов и их твердых растворов. Раскрыты основные вопросы, касающиеся люминесценции ионов  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ , использования  $\text{Eu}^{3+}$  как люминесцентного зонда для определения локального окружения, а также передачи энергии возбуждения в этой паре.

**Вторая глава** посвящена описанию оптимизации метода синтеза тантало-ниобатов гадолиния, а также основным методам исследования полученных образцов.

В разделе 2.1 подробно раскрыт способ синтеза методом соосаждения с последующей прокалкой при температуре 1200 °С. Керамика в виде таблеток диаметром до 1 см была получена из порошков методом холодного прессования при давлении  $10^3$  кг/см<sup>2</sup>. В оптимизированной методике использовались температуры спекания до 1400 °С. Были получены четыре серии тантало-ниобатов гадолиния – неактивированных, активированных  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ , либо  $\text{Eu}^{3+}+\text{Tb}^{3+}$ :  $(\text{GdNb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$  ( $y = 0\div 1$ );  $(\text{Gd}_{1-z}\text{Tb}_z)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$  ( $z = 0.05\div 0.2$ ;  $y = 0.9, 1$ );  $(\text{Gd}_{1-x}\text{Eu}_x)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$  ( $x = 0.01\div 0.4$ ;  $y = 0\div 1$ );  $(\text{Gd}_{0.94-z}\text{Eu}_{0.06}\text{Tb}_z)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$  ( $z = 0.06\div 0.3$ ;  $y = 0\div 1$ ). Для краткого обозначения конкретного образца принята следующая система:

$\text{Nb}_y\text{-A-x}$ ,

где  $y$  – содержание ниобия в соотношении Nb/Ta образца, форм. ед. (например, 0; 0.3; 1);  $A$  – вид активатора (Eu; Tb; EuTb, где Eu – 0.06 форм. ед.);  $x$  – содержание активатора, форм. ед.

Таким образом, каждый образец был представлен в виде порошка, прокаленного при 1200 °С, и в виде керамики, спеченной при 1400 °С.

В разделе 2.2 представлены исследования, проводившиеся в процессе оптимизации метода синтеза для контроля промежуточных результатов. Исследования проводились такими методами, как масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС), синхронный термический анализ (СТА), дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) и термогравиметрия (ТГ).

Основными методами исследования полученных материалов, описанными в разделе 2.3, являлись: рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) – для исследования элементного состава; рентгенодифракционный фазовый анализ (РДФА) – для изучения фазового состава и структурных параметров; локальная катодолюминесценция (КЛ) – для исследования катодолюминесцентных свойств (спектры КЛ, КЛ изображения, кинетика затухания полос КЛ, эффективность захвата возбуждения различными излучательными уровнями); фотолюминесценция (ФЛ) – для получения спектров ФЛ и спектров возбуждения. Кроме того, в этом разделе подробно описана методика исследования кинетики КЛ и определения эффективности захвата возбуждения излучательным уровнем активатора (коэффициент  $L$ ). Данный коэффициент показывает количество актов возбуждения центров люминесценции за единицу времени при единичной плотности тока и имеет размерность  $\text{мкм}^2\text{мс}^{-1}\text{нА}^{-1}$ .

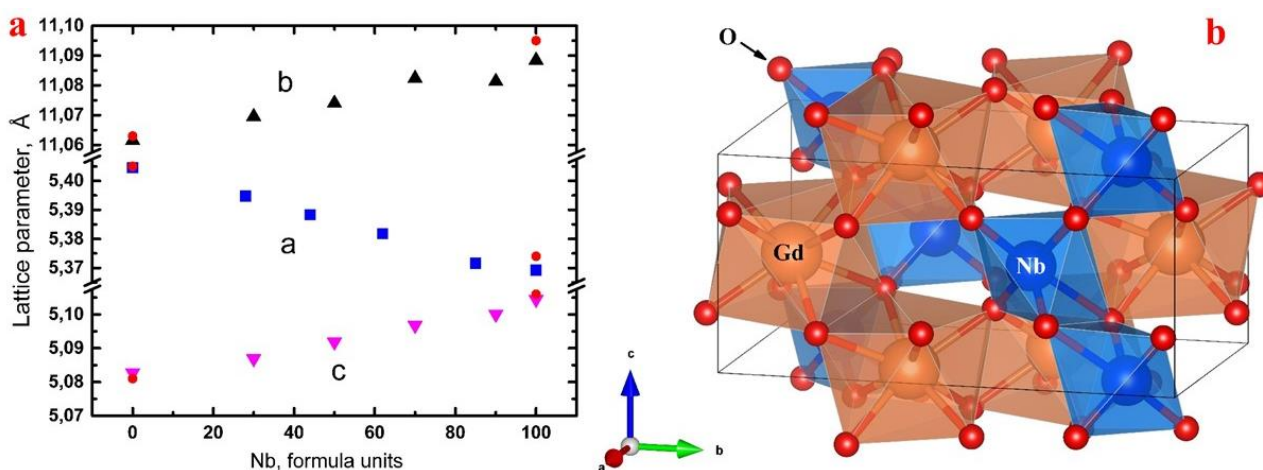
В **третьей главе** представлены результаты исследований элементного состава и структурных параметров полученных материалов.

В разделе 3.1 методом РСМА подробно изучен элементный состав, однородность распределения активаторов во всех образцах. Установлено, что средний элементный состав большинства полученных материалов соответствовал составу исходной шихты. Обнаруженные отклонения учтены в дальнейших исследованиях.

В разделе 3.2 представлены СЭМ изображения. Показано, что исследованная керамика состояла из вытянутых конгломератов неправильной формы с максимальной шириной порядка 2-4 мкм.

Фазовый состав полученных материалов подробно исследовался в разделе 3.3. Установлено, что основной фазой всех образцов являлась моноклинная структура. Также проанализировано содержание примесей иных фаз (таких, как  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Gd}_3\text{TaO}_7$ ,  $\text{Gd}_3\text{NbO}_7$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  и др.).

В разделе 3.4 изучены зависимости параметров моноклинной элементарной ячейки от соотношения Nb/Ta и содержания активатора (пример – рис. 1а). С их помощью было подтверждено образование твердого раствора замещения тантало-ниобатов гадолиния. На основании экспериментальных данных определена и описана структура исследованных тантало-ниобатов гадолиния (рис. 1б). Для этих структур показано уменьшение объема элементарной ячейки и расстояний между атомами в полиэдрах  $GdO_8$  и  $NbO_6$  ( $TaO_6$ ), составляющих структуру, в ряду от  $GdNbO_4$  к  $GdTaO_4$ . Для серии  $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$  приводятся рассчитанные значения области когерентного рассеяния (ОКР).

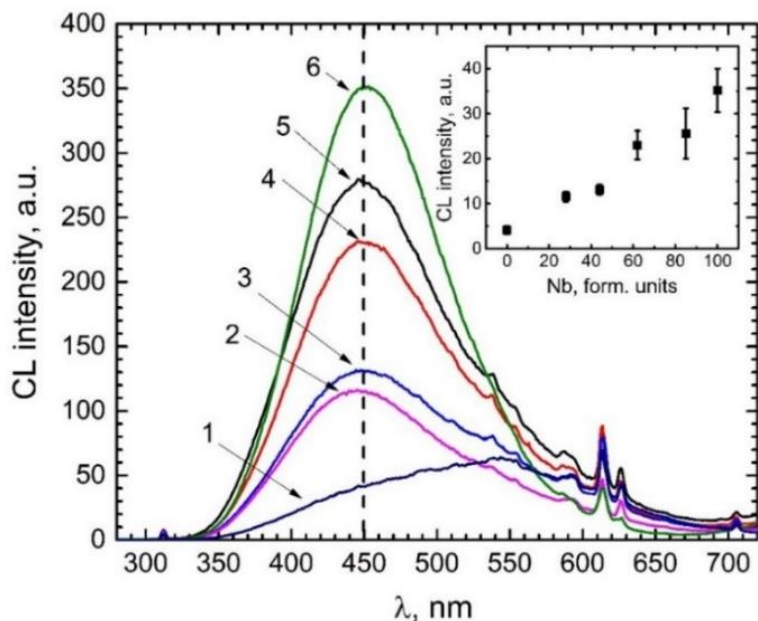


**Рис. 1.** (а) зависимости параметров решетки (a, b, c) от содержания Nb серии керамики  $GdNb_yTa_{1-y}O_4$ . Красные точки соответствуют параметрам решетки для  $GdNbO_4$  и  $GdTaO_4$ , взятым из карт базы данных ICDD, наиболее точно описывающих экспериментальные дифрактограммы; (б) кристаллическая структура образца  $Nb_{1-x}Eu_xO_4$ , где атомы РЗИ-активатора могут замещать атомы Gd.

**Четвертая глава** посвящена исследованию люминесцентных свойств серий  $GdNb_yTa_{1-y}O_4$ ;  $(Gd_{1-z}Tb_z)Nb_yTa_{1-y}O_4$  и  $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$ .

В разделе 4.1 исследованы спектры КЛ и концентрационные зависимости интенсивностей люминесценции различных полос излучения, представлены КЛ изображения. Показано изменение интенсивности КЛ широкой полосы собственной люминесценции, связанной с группами  $NbO_4^{3-}$ , в зависимости от соотношения Nb/Ta в серии  $GdNb_yTa_{1-y}O_4$  (рис. 2) и от содержания  $Eu^{3+}$  в серии  $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$ . На основании последнего, показана возможность передачи энергии возбуждения от группы  $NbO_4^{3-}$  к РЗИ-активатору. В разделе приведена подробная интерпретация полученных спектров  $Eu^{3+}$  (рис. 3). Метод КЛ позволил наблюдать не только низкоэнергетические переходы с уровня  $^5D_0$   $Eu^{3+}$ , но также высокоэнергетические переходы с уровней  $^5D_1$ ,  $^5D_2$  и  $^5D_3$ . На основании концентрационных зависимостей интенсивности люминесценции полосы  $^5D_0-^7F_2$   $Eu^{3+}$  (рис. 4) показаны содержания активатора, при которых начиналось концентрационное тушение центров люминесценции в серии

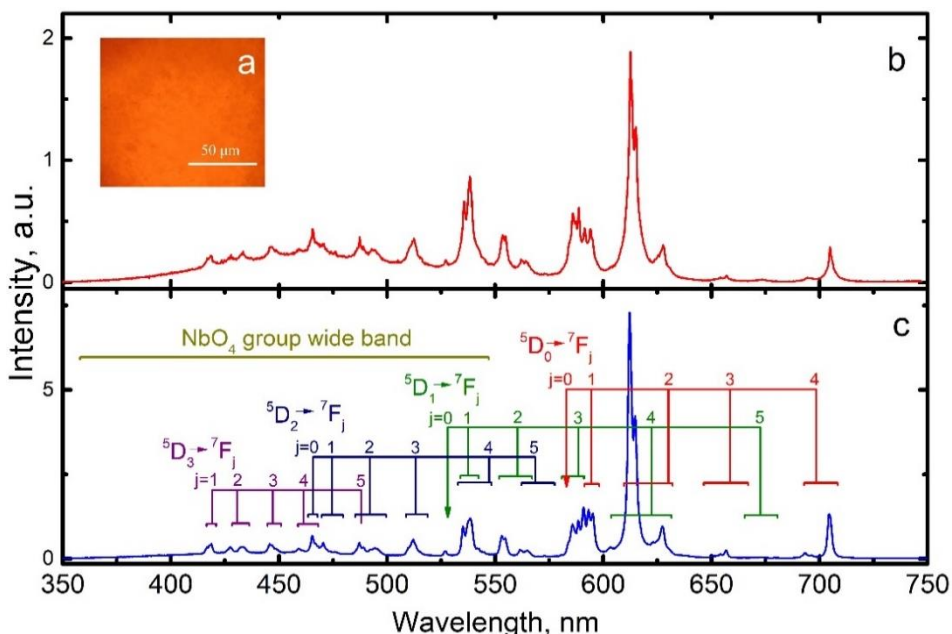
$(\text{Gd}_{1-x}\text{Eu}_x)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$ . Явление тушения происходило из-за увеличения вероятности безызлучательной потери энергии при взаимодействии центров люминесценции между собой.



**Рис. 2.** КЛ спектры образцов керамики  $\text{GdNb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$ : (1)  $\text{Nb}_0$ ; (2)  $\text{Nb}_{0.5}$ ; (3)  $\text{Nb}_{0.3}$ ; (4)  $\text{Nb}_{0.7}$ ; (5)  $\text{Nb}_{0.9}$ ; (6)  $\text{Nb}_1$ . Во вставке показана зависимость интенсивности КЛ (на длине волны 450 нм) от содержания Nb.

**Рис. 3.**

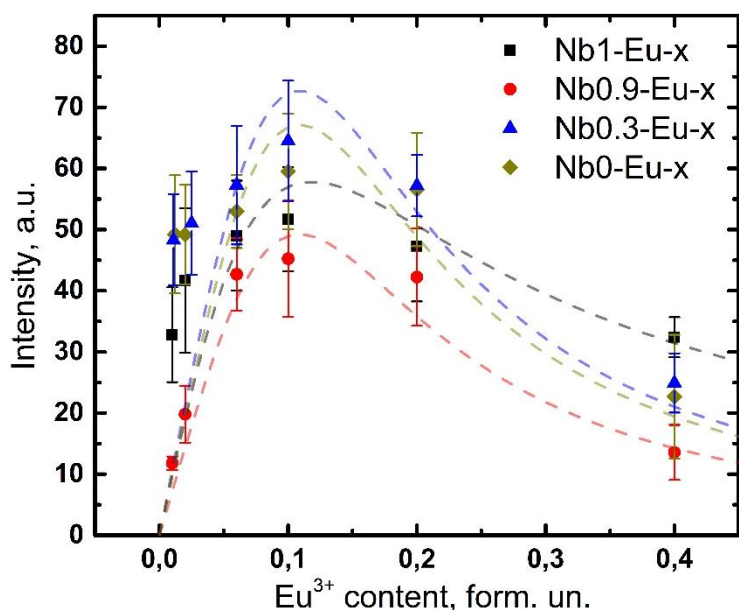
(а) КЛ изображение образца  $\text{Nb}_{0.3}\text{-Eu-0.02}$ ; (б) спектр КЛ образца  $\text{Nb}_{0.9}\text{-Eu-0.02}$ ; (с) спектр КЛ образца  $\text{Nb}_{0.3}\text{-Eu-0.02}$ .



Кроме того, в разделе исследованы спектры КЛ серии  $(\text{Gd}_{1-z}\text{Tb}_z)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$ , получены КЛ изображения образцов этой серии и проанализированы концентрационные зависимости интенсивности КЛ полосы  ${}^5\text{D}_4\text{-}{}^7\text{F}_5$   $\text{Tb}^{3+}$  (рис. 5).

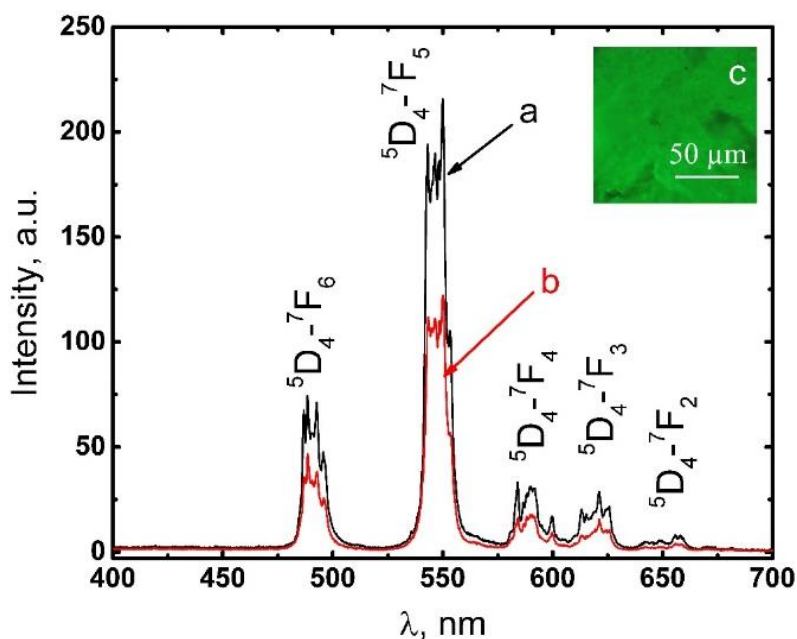
Спектры фотолюминесценции (ФЛ) рассматриваются в разделе 4.2. Показывается, что форма полос, связанных с переходами с уровней  ${}^5\text{D}_0$ ,  ${}^5\text{D}_1$   $\text{Eu}^{3+}$ , в спектрах ФЛ и КЛ аналогична. Хотя более высокоэнергетические переходы в ФЛ не наблюдались, в отличие от спектров КЛ, ФЛ позволила исследовать переход  ${}^5\text{D}_0\text{-}{}^7\text{F}_0$   $\text{Eu}^{3+}$ . Этот переход не обладал расщеплением в кристаллическом поле, т.е. одной фазе соответствовала одна полоса на спектре. В спектрах ФЛ образцов, имевших высокое содержание примесных фаз, наблюдалось несколько

полос  ${}^5D_0-{}^7F_0$ . Также показаны отличия в форме спектров для различных политипов тантало-ниобатов гадолиния на примере порошков и керамики составов Nb0.9-Eu-0.06 и Nb0-Eu-0.06.



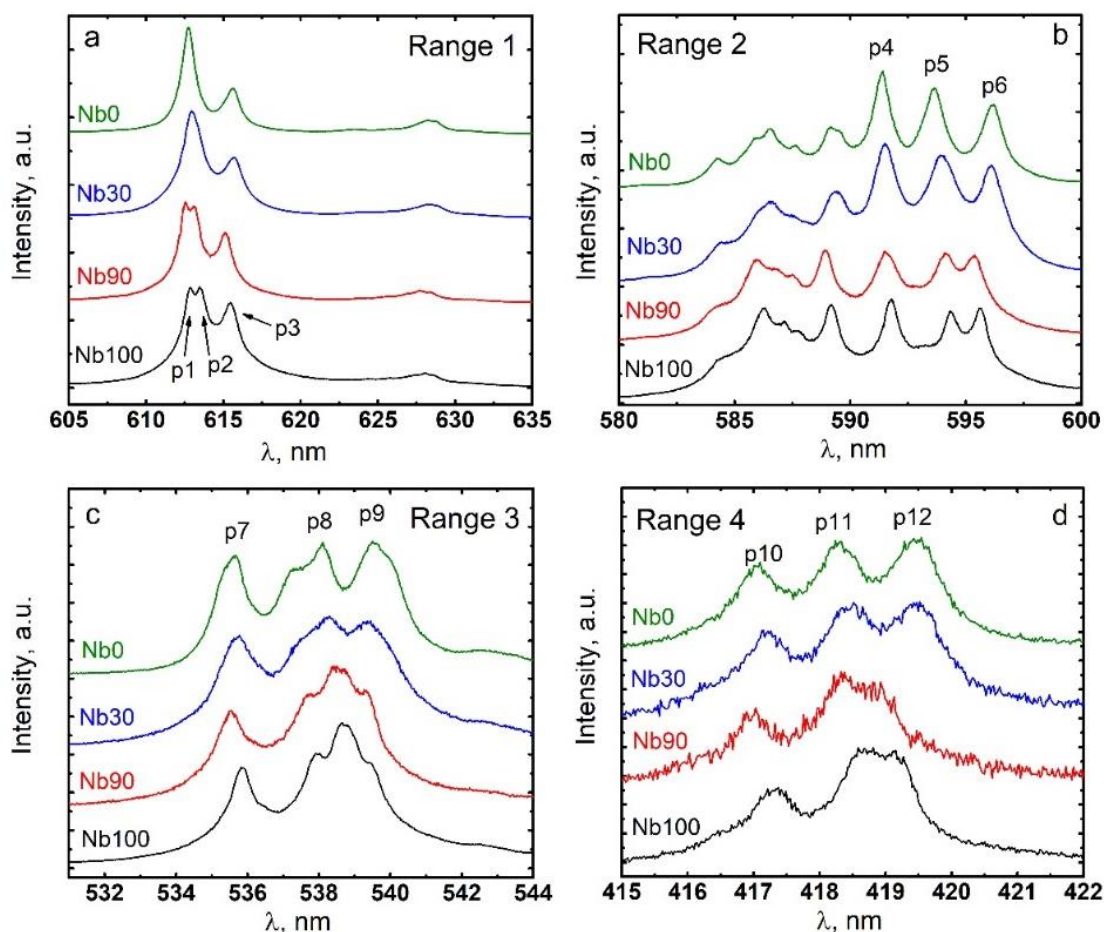
**Рис. 4.** Зависимости интенсивности КЛ полосы  ${}^5D_0-{}^7F_2$   $\text{Eu}^{3+}$  от концентрации активатора для серий  $(\text{Gd}_{1-x}\text{Eu}_x)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$ .

**Рис. 5.** Спектры КЛ керамики серии  $(\text{Gd}_{1-z}\text{Tb}_z)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$ :  
 (a) Nb0.9-Tb-0.05;  
 (b) Nb1-Tb-0.05;  
 (c) КЛ изображение образца Nb1-Tb-0.05.



Раздел 4.3 посвящен более подробному рассмотрению различия в тонкой структуре спектров люминесценции  $\text{Eu}^{3+}$  при изменении соотношения Nb/Ta в  $(\text{Gd}_{1-x}\text{Eu}_x)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$ . Проведено сравнение спектров КЛ, полученных при комнатной температуре и температуре жидкого азота. В диапазоне 580-625 нм наблюдалось наложение большого количества штарковских полос, относящихся к переходам с уровней  ${}^5D_0$  и  ${}^5D_1$ . Для их разделения были исследованы спектры КЛ с временным разрешением. Поскольку времена затухания для переходов с уровня  ${}^5D_1$  на два порядка меньше, чем для переходов с уровня  ${}^5D_0$ , то полосы, относящиеся к уровню  ${}^5D_1$ , не проявились в полученном спустя 20 мкс после отклонения электронного пучка спектре КЛ.

В разделе описываются четыре диапазона спектра КЛ, значительно отличающиеся для четырех образцов серии  $(\text{Gd}_{1-x}\text{Eu}_x)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$ . Эти образцы имели одинаковую концентрацию ионов  $\text{Eu}^{3+}$ , но различное соотношение Nb/Ta. Концентрация  $\text{Eu}^{3+}$ , равная 0.06 форм. ед. соответствовала содержанию активатора до наступления концентрационного тушения. В каждом из выбранных диапазонов были отобраны конкретные полосы  $p_i$  ( $i=1-12$ ) конкретных переходов, таких как  ${}^5\text{D}_0-{}^7\text{F}_2$ ,  ${}^5\text{D}_0-{}^7\text{F}_1$ ,  ${}^5\text{D}_1-{}^7\text{F}_1$  и  ${}^5\text{D}_3-{}^7\text{F}_1$ , для изучения их поведения в зависимости от состава образца (рис. 6). Это позволило исследовать влияние локального поля, действующего на ионы  $\text{Eu}^{3+}$ , на величину штарковского расщепления.



**Рис. 6.** Диапазоны спектра КЛ  $(\text{Gd}_{0.94}\text{Eu}_{0.06})\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$ : (а) Диапазон 1 (605-635 нм),  ${}^5\text{D}_0-{}^7\text{F}_2$ ,  ${}^5\text{D}_1-{}^7\text{F}_4$ ; (б) Диапазон 2 (580-600 нм),  ${}^5\text{D}_0-{}^7\text{F}_1$ ,  ${}^5\text{D}_1-{}^7\text{F}_3$ ; (с) Диапазон 3 (531-544 нм),  ${}^5\text{D}_1-{}^7\text{F}_1$ ,  ${}^5\text{D}_2-{}^7\text{F}_4$ ; (д) Диапазон 4 (415-422 нм),  ${}^5\text{D}_3-{}^7\text{F}_1$ . Жирным выделены переходы, расстояния между полосами штарковского расщепления которых были исследованы.

Раздел 4.4 посвящен исследованиям кинетики затухания излучательных полос  $\text{Eu}^{3+}$  и  $\text{Tb}^{3+}$ . Обсуждаются причины уменьшения измеряемых времен затухания, связанные с влиянием дефектов структуры. Также обсуждаются причины наблюдения двух компонент в кривой затухания полос, связанных с переходами  ${}^5\text{D}_0-{}^7\text{F}_2$   $\text{Eu}^{3+}$  и  ${}^5\text{D}_4-{}^7\text{F}_5$   $\text{Tb}^{3+}$ . Наличие второго, более короткого времени затухания могло быть связано с увеличением вероятности

безызлучательной рекомбинации центров люминесценции, находящихся вблизи границ зерен керамики и протяженных дефектов. Таким образом, чем больше в данном образце протяженность границ между отдельными кристаллитами и меньше ОКР, тем больше должен быть вклад короткого времени затухания при аппроксимировании кривой затухания интенсивности КЛ. Показана зависимость вкладов двух временных компонент в аппроксимацию кинетики затухания от величины ОКР для конкретного образца.

В разделе также показаны концентрационные зависимости времен затухания ( $\tau$ ) от содержания  $\text{Eu}^{3+}$  (рис. 7) и  $\text{Tb}^{3+}$ . На их основании подтверждаются выводы о концентрациях, при которых начиналось концентрационное тушение люминесценции. После этих концентраций времена затухания значительно уменьшались.

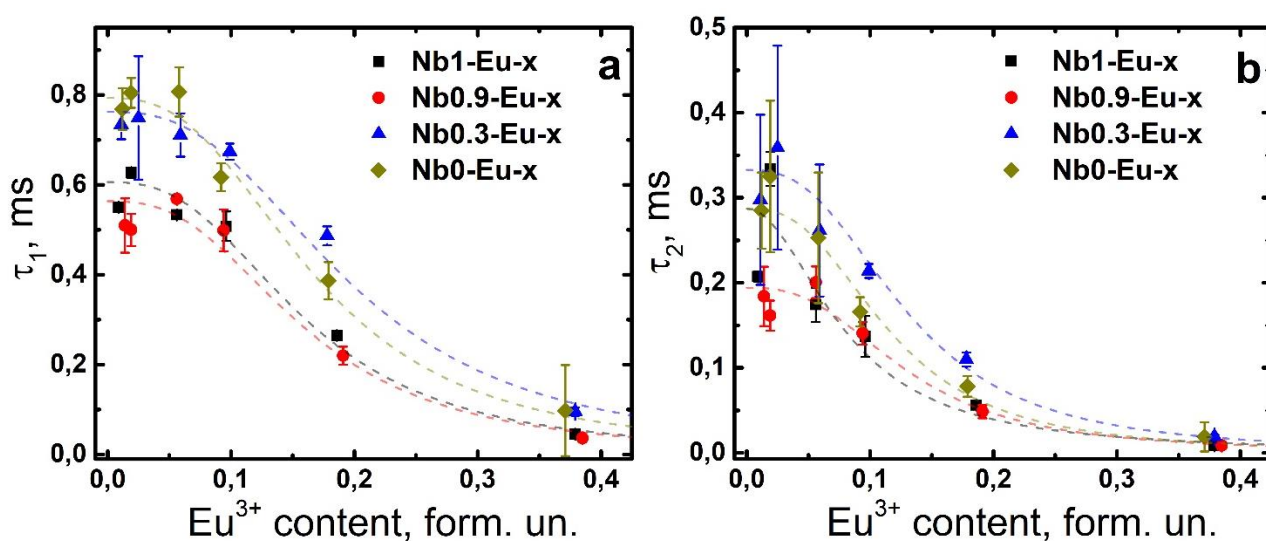


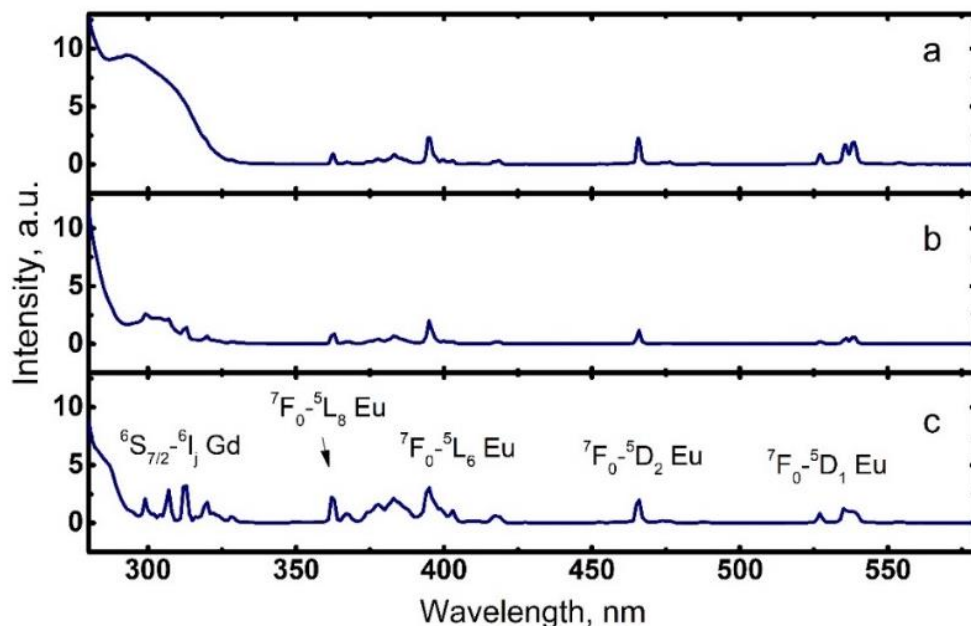
Рис. 7. Концентрационные зависимости времен затухания полосы  ${}^5\text{D}_0\text{-}{}^7\text{F}_2$   $\text{Eu}^{3+}$  для различных серий керамики  $(\text{Gd}_{1-x}\text{Eu}_x)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$ : (a)  $\tau_1$ , (b)  $\tau_2$ .

В пятой главе показаны результаты исследований эффективности захвата возбуждения различными излучательными уровнями активаторов в  $(\text{Gd}_{1-x}\text{Eu}_x)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$  и  $(\text{Gd}_{1-z}\text{Tb}_z)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$ , а также изучена передача энергии возбуждения к активаторам для материалов, активированных  $\text{Eu}^{3+}+\text{Tb}^{3+}$ .

В разделе 5.1 показано, что для серии  $(\text{Gd}_{1-x}\text{Eu}_x)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$  эффективность захвата возбуждения (коэффициент  $L$ ) уровня  ${}^5\text{D}_0$   $\text{Eu}^{3+}$  в танталатах гадолиния выше, чем в ниобатах и промежуточных твердых растворах. Также рассматривается влияние добавки 0.1 форм. ед. Та в ниобат гадолиния на эффективность захвата для серии  $(\text{Gd}_{1-z}\text{Tb}_z)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$ .

Для объяснения различий в эффективностях захвата возбуждения были подробно рассмотрены спектры возбуждения излучательного уровня  ${}^5\text{D}_0$   $\text{Eu}^{3+}$  (рис. 8). Это демонстрируется в разделе 5.2. Установлено, что каналы возбуждения для уровня  ${}^5\text{D}_0$   $\text{Eu}^{3+}$  различны и зависят от содержания тантала.

Так, в танталатах гадолиния существенную роль играют возбужденные уровни  $Gd^{3+}$ . Также рассмотрены спектры возбуждения для уровня  ${}^5D_4$   $Tb^{3+}$ . Предложены схемы передачи энергии в исследованных материалах.



**Рис. 8.** Спектры возбуждения (для полосы 612 нм,  ${}^5D_0$ - ${}^7F_2$   $Eu^{3+}$ ) образцов серии  $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$ : (a) Nb1-Eu-0.06; (b) Nb0.9-Eu-0.06; (c) Nb0-Eu-0.06.

В разделе 5.3 исследована передача энергии от  $Tb^{3+}$  к  $Eu^{3+}$  на примере модельных образцов кубического  $ZrYO_2:Eu^{3+},Tb^{3+}$ . Показаны изменения в спектрах люминесценции активатора, кинетических зависимостях излучательных полос и спектрах возбуждения излучательных уровней в случае, когда наблюдается явление сенсбилизации европия тербием. Далее в разделе представлены аналогичные исследования для  $(Gd_{1-x-z}Eu_xTb_z)Nb_yTa_{1-y}O_4$ . Обсуждаются отличия в наблюдаемых явлениях по сравнению с модельными образцами  $ZrYO_2:Eu^{3+},Tb^{3+}$ . Показано, в том числе с помощью спектров возбуждения (рис. 9), что в тантало-ниобатах гадолиния, активированных  $Tb^{3+}+Eu^{3+}$ , существует процесс переноса энергии возбуждения не только от ионов трехвалентного тербия к ионам европия, но и обратный процесс переноса энергии возбуждения от ионов  $Eu^{3+}$  к ионам  $Tb^{3+}$ .



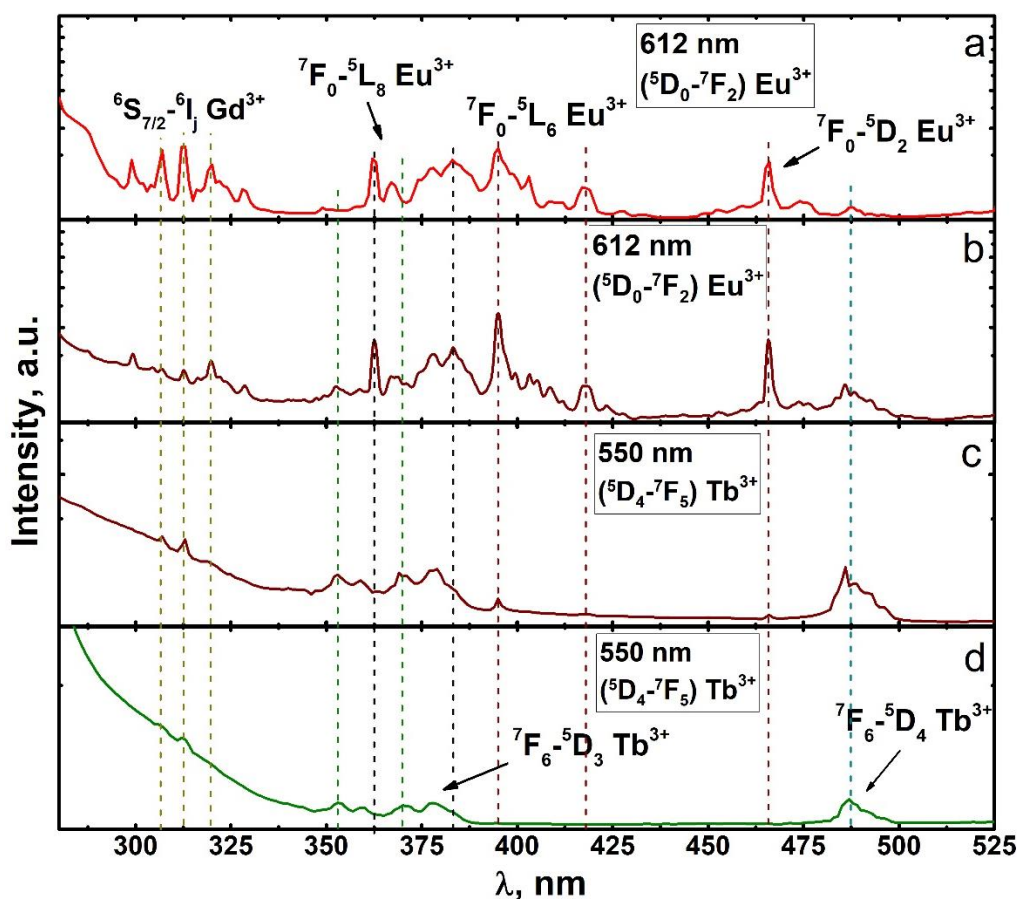


Рис. 9. Спектры возбуждения керамики: полоса  ${}^5D_0$ - ${}^7F_2$   $\text{Eu}^{3+}$  – (a) Nb0-Eu-0.06, (b) Nb0.3-EuTb-0.06; полоса  ${}^5D_4$ - ${}^7F_5$   $\text{Tb}^{3+}$  – (c) Nb0.3-EuTb-0.06, (d) Nb0.9-Tb-0.05.

В заключении описаны основные выводы диссертации:

1) Оптимизирован способ синтеза порошков тантало-ниобатов гадолиния методом соосаждения с последующей прокалкой при температуре 1200 °С. Отработано получение керамики из синтезированных порошков методом холодного прессования с последующим спеканием на воздухе. Максимальные температуры, используемые в методе, не превышали 1400 °С, время спекания составляло менее 4 часов.

2) Впервые были синтезированы серии тантало-ниобатов гадолиния, активированных РЗИ, такие как  $(\text{Gd}_{1-z}\text{Tb}_z)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$  ( $z = 0.05 \div 0.2$ ;  $y = 0.9, 1$ );  $(\text{Gd}_{1-x}\text{Eu}_x)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$  ( $x = 0.01 \div 0.4$ ;  $y = 0 \div 1$ );  $(\text{Gd}_{0.94-z}\text{Eu}_{0.06}\text{Tb}_z)\text{Nb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$  ( $z = 0.06 \div 0.3$ ;  $y = 0 \div 1$ ), а также неактивированная серия  $\text{GdNb}_y\text{Ta}_{1-y}\text{O}_4$  ( $y = 0 \div 1$ ).

3) Большинство полученных материалов имело средний элементный состав, соответствующий составу исходной шихты. Все исследованные порошки, содержащие Nb, имели структуру моноклинной сингонии с пространственной группой  $I2/a$  (M-политип). Порошки танталатов гадолиния имели структуру  $M'$ -политипа с пространственной группой  $P2/a$ . Относительное содержание примесных фаз не превышало 15 масс.%. Все исследованные керамические материалы имели моноклинную структуру  $I2/a$  (M-политип).

Относительное содержание примесных фаз по сравнению с порошками уменьшилось в 2-5 раз. На основании зависимостей параметров решетки от содержания Nb показано успешное образование твердого раствора замещения.

4) В спектрах КЛ наблюдались полосы, связанные с переходами с энергетических уровней  ${}^5D_0$ ,  ${}^5D_1$ ,  ${}^5D_2$  и  ${}^5D_3$  на уровни  ${}^7F_j$  ( $j = 0-5$ )  $Eu^{3+}$  в диапазоне 350-750 нм для серии  $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$  и с уровня  ${}^5D_4$  на уровни  ${}^7F_j$  ( $j=2-6$ )  $Tb^{3+}$  в диапазоне 400-700 нм для серии  $(Gd_{1-z}Tb_z)Nb_yTa_{1-y}O_4$ .

5) Концентрационное тушение как в серии  $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$ , так и в серии  $(Gd_{1-z}Tb_z)Nb_yTa_{1-y}O_4$  начиналось при концентрациях активатора от 0.1 до 0.2 форм. ед. Для большинства образцов интенсивность люминесценции активатора явно не зависела от соотношения Nb/Ta в составе.

6) Исследована величина штарковского расщепления КЛ полос  $Eu^{3+}$ , относящихся к разным энергетическим уровням, в зависимости от соотношения Nb/Ta. Более высокое содержание тантала в составе приводило к большей величине локального поля, действующего на  $Eu^{3+}$ . Следовательно, штарковское расщепление увеличивалось в ряду твердых растворов от  $(GdEu)NbO_4$  к  $(GdEu)TaO_4$ .

7) Анализ кинетики затухания КЛ полос  ${}^5D_0-{}^7F_2$   $Eu^{3+}$  и  ${}^5D_4-{}^7F_5$   $Tb^{3+}$  показал два времени затухания. Более короткие времена могли быть связаны с увеличением вероятности безызлучательной рекомбинации для ионов, расположенных вблизи протяженных дефектов и границ зерен керамики.

8) Для всех составов, содержащих Nb, эффективность захвата возбуждения уровня  ${}^5D_0$   $Eu^{3+}$  одинакова в пределах погрешности измерения ( $\sim 2500$  мкм<sup>2</sup>мс<sup>-1</sup>нА<sup>-1</sup>). Для танталата гадолия эффективность захвата выше на  $\sim 15\%$ . В серии  $(Gd_{1-z}Tb_z)Nb_yTa_{1-y}O_4$ , при  $y = 1$  и 0.9, эффективность захвата уровня  ${}^5D_4$   $Tb^{3+}$  составила порядка  $1000$  мкм<sup>2</sup>мс<sup>-1</sup>нА<sup>-1</sup>.

9) В тантало-ниобатах гадолия, активированных  $Eu^{3+}$  и  $Tb^{3+}$ , наблюдается процесс передачи энергии возбуждения от ионов  $Tb^{3+}$  к ионам  $Eu^{3+}$ , а также обратный процесс передачи энергии от ионов  $Eu^{3+}$  к ионам  $Tb^{3+}$ .

10) На основании полученных данных, в том числе спектров возбуждения люминесценции, были предложены схемы передачи энергии возбуждения между различными энергетическими уровнями для  $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$ ,  $(Gd_{1-z}Tb_z)Nb_yTa_{1-y}O_4$  и  $(Gd_{0.94-z}Eu_{0.06}Tb_z)Nb_yTa_{1-y}O_4$ .

Полученные результаты могут быть полезны для лучшего понимания изменения люминесцентных свойств в зависимости от структурных свойств материала и механизмов преобразования высокоэнергетического излучения в оптическое. Это может быть использовано при разработке эффективных сцинтилляторов, гамма- и рентгенолюминофоров.

## Список публикаций автора по теме диссертации

A1. E.V. Ivanova, V.A. Kravets, K.N. Orekhova, **G.A. Gusev**, T.B. Popova, M.A. Yagovkina, O.G. Bogdanova, B.E. Burakov, M.V. Zamoryanskaya. Properties of Eu<sup>3+</sup>-doped zirconia ceramics synthesized under spherical shock waves and vacuum annealing // J. Alloys Compd. – 2019. – Vol. 808. – P. 151778. – DOI:10.1016/j.jallcom.2019.151778

A2. E.V. Ivanova, S.M. Masloboeva, V.A. Kravets, K.N. Orekhova, **G.A. Gusev**, A.N. Trofimov, O.B. Scherbina, M.A. Yagovkina, A.A. Averin, M.V. Zamoryanskaya. Synthesis and luminescent properties of gadolinium tantalum niobates Gd(Nb<sub>x</sub>Ta<sub>1-x</sub>)O<sub>4</sub> // Opt. Spectrosc. – 2019. – Vol. 127. – № 6. – P. 1011. – DOI:10.1134/S0030400X19120348

A3. **G.A. Gusev**, K.N. Orekhova, V.A. Kravets, A.I. Isakov, A.N. Trofimov, M.V. Zamoryanskaya. Kinetic properties of YAG:Eu<sup>3+</sup> emission upon electron beam excitation // J. Lumin. – 2020. – Vol. 222. – P. 117084. – DOI:10.1016/j.jlumin.2020.117084

A4. **G.A. Gusev**, S.M. Masloboeva, M.V. Zamoryanskaya. The study of gadolinium tantalum niobate (Gd(Nb<sub>x</sub>Ta<sub>1-x</sub>)O<sub>4</sub>) by local cathodoluminescence technique // J. Phys.: Conf. Ser. – 2020. – Vol. 1697. – №. 1. – P. 012154. – DOI:10.1088/1742-6596/1697/1/012154

A5. **Г.А. Гусев**, С.М. Маслوبةва, В.А. Кравец, М.А. Яговкина. Получение и исследование ниобатов-танталатов гадолиния, активированных ионами европия // Неорг. Матер. – 2021. – Т. 57. – №. 4. – С. 404. – DOI:10.31857/S0002337X21040060

G.A. Gusev, S.M. Masloboeva, V.A. Kravets, M.A. Yagovkina. Preparation and characterization of gadolinium niobate tantalates activated with europium ions // Inorg. Mater. – 2021. – Vol. 57. – №. 4. – P. 383. – DOI:10.1134/S0020168521040063

A6. M.V. Zamoryanskaya, K.N. Orekhova, E.V. Dementeva, V.A. Kravets, **G.A. Gusev**. Excitation capture efficiency of rare-earth ions emission levels upon electron-beam irradiation // J. Lumin. – 2021. – Vol. 239. – P. 118350. – DOI:10.1016/j.jlumin.2021.118350

A7. **Г.А. Гусев**, С.М. Маслوبةва, М.А. Яговкина, М.В. Заморянская. Синтез и исследование люминесцентных свойств тантало-ниобата гадолиния, активированного тербием // Оптика спектроск. – 2022. – Т. 130. – №. 2. – С. 294. – DOI:10.21883/OS.2022.02.51998.2759-21

G.A. Gusev, S.M. Masloboeva, M.A. Yagovkina, M.V. Zamoryanskaya. Synthesis and study of the luminescent properties of terbium-activated gadolinium tantalum-niobate. // Opt. Spectrosc. – 2022. – Vol. 130. – №. 2. – P. 265. – DOI:10.21883/EOS.2022.02.53221.2759-21

А8. А.А. Шакирова, Г.А. Гусев, Е.В. Дементьева, А.А. Аверин, Т.Б. Попова, М.В. Заморянская. Сенсibilизация ионов европия ( $\text{Eu}^{3+}$ ) тербием ( $\text{Tb}^{3+}$ ) в керамике на основе кубического диоксида циркония, стабилизированного иттрием // Оптика спектроск. – 2022. – Т. 130. – №. 10. – С. 1578. – DOI:10.21883/OS.2022.10.53629.3655-22

A.A. Shakirova, G.A. Gusev, E.V. Dementeva, A.A. Averin, T.B. Popova, M.V. Zamoryanskaya. Sensitization of europium ( $\text{Eu}^{3+}$ ) ions by terbium ( $\text{Tb}^{3+}$ ) in ceramics based on yttrium stabilized cubic zirconium dioxide // Opt. Spectrosc. – 2022. – Vol. 130. – №. 10. – P. 1319. – DOI:10.21883/EOS.2022.10.54870.3655-22

А9. Г.А. Гусев, С.М. Маслбоева, Т.В. Попова, М.А. Ягловкина, М.В. Заморянская, Influence of gadolinium tantalum niobates doped with  $\text{Eu}^{3+}$  ions structural properties on luminescence spectrum features // J. Lumin. – 2022. – Vol. 252. – P. 119281. – DOI:10.1016/j.jlumin.2022.119281

А10. М.В. Заморянская, К.Н. Орехова, Г.А. Гусев, С.М. Маслбоева, А.А. Шакирова, Е.В. Дементьева, Б.Е. Бураков. Керамические радиационно стойкие сцинтилляторы для регистрации высокоэнергетического излучения // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: технические науки. – 2023. – Т. 14. – №. 1. – С. 52. – DOI:10.37614/2949-1215.2023.14.1.009

### Список литературы

1. Tavernier, S. et al. Radiation detectors for medical applications. – New York: Springer, 2006. – p. 315.

2. Lecoq, P. et al. Inorganic scintillators for detector systems: physical principles and crystal engineering, second ed. – Switzerland: Springer. 2017. – p. 408.

3. Dou, R. et al. Rare-earth tantalates and niobates single crystals: Promising scintillators and laser materials // Crystals. – 2018. – Vol. 8. – №. 2. – P. 55.

4. Ding, S. et al. Energy-level structure and spectral analysis of  $\text{Nd}^{3+}$  in  $\text{GdNbO}_4$  crystal // Opt. Mater. – 2017. – Vol. 64. – P. 474.

5. Lee, S.K. et al. Electronic structures and luminescence properties of  $\text{YNbO}_4$  and  $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$  // J. Solid State Chem. – 2001. – Vol. 156. – P. 267.

6. Nazarov, M.V. et al. Luminescence properties of europium-terbium double activated calcium tungstate phosphor // Solid State Commun. – 2004. – Vol. 131. – P. 307.

7. Su, M.Z. et al. Spectroscopic properties of rare earths in optical materials. – Berlin: Springer, 2005. – P. 500.

8. Xiao, X. et al. Synthesis and luminescent properties of novel  $\text{RENbO}_4:\text{Ln}^{3+}$  ( $\text{RE} = \text{Y}, \text{Gd}, \text{Lu}$ ;  $\text{Ln} = \text{Eu}, \text{Tb}$ ) micro-crystalline phosphors // J. Non-Cryst. Solids. – 2005. – Vol. 351. – P. 3634.

9. Voloshyna, O.V. et al. New, dense, and fast scintillators based on rare-earth tantalum-niobates // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2014. – Vol. 764. – P. 227.

10. Sidletskiy, O. et al. Trends in search for bright mixed scintillators, *Phys. Status Solidi A.* – 2018. – Vol. 215. – P. 1701034.
11. Vishwnath, V. et al. Optical properties of Eu (III) doped strontium gadolinium niobate oxide // *AIP Conf. Proc.* – 2016. – Vol. 1731. – №. 1. – P. 110019.
12. Liu, B. et al. Enhanced luminescence through ion-doping-induced higher energy phonons in  $\text{GdTaO}_4:\text{Eu}^{3+}$  // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – Vol. 94. – P. 061906.
13. Pan, L. et al. Scintillation, luminescence and optical properties of Ce-Doped borosilicate glasses // *Opt. Mater.* – 2020. – Vol. 104. – P. 109847.
14. Swiderski, L. et al. Scintillation response to gamma-rays measured at wide temperature range for Tl doped CsI with SiPM readout // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.* – 2019. – Vol. 916. – P. 32.
15. Wolszczak, W. et al. Nonproportional response of scintillators to alpha particle excitation // *IEEE Transactions on Nuclear Science.* – 2017. – Vol. 64. – P. 1580.
16. Orekhova, K. et al. The study of composition, structure and cathodoluminescent features of  $\text{YAG}:\text{Eu}^{3+}$  nanoceramics. Excitation capture efficiency of  $\text{Eu}^{3+}$  energy levels // *J. Alloys Compd.* – 2021. – Vol. 858. – P. 157731.
17. Kravets, V.A. et al.  $\text{Eu}^{3+}$  As a luminescent probe for studying the structure of  $\text{R}_2\text{O}_3$  materials (R = Y, Eu, and Gd), *Opt. Spectrosc.* – 2018. – Vol. 125. – P. 188.