

Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

УДК 666.265, 539.1.09, 535-31+535-34

ХОРОШКО  
Людмила Сергеевна

**СИНТЕЗ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ АЛЮМОИТТРИЕВЫХ  
КОМПОЗИТОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ТЕРБИЕМ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

по специальности 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы

Минск 2018

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Гапоненко Николай Васильевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией «Нанопотоника» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Прищепя Сергей Леонидович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры Защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
**Леончик Сергей Викентьевич**, кандидат физико-математических наук, заведующий Лабораторией оптической спектроскопии полупроводников ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

Оппонирующая организация Государственное научное учреждение «Институт физики им. Б.И. Степанова» Национальной академии наук Беларуси

Защита состоится «27» декабря 2018 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.07 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232.

Телефон технического секретаря +375 (17) 293-89-89 e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «27» ноября 2018 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
доктор физико-математических наук, доцент

Д. Б. Мигас

## **ВВЕДЕНИЕ**

Формирование наноструктурированных люминофоров, возбуждаемых ультрафиолетовым, рентгеновским и другими видами излучений, является одной из актуальных задач для разработки конвертеров различных видов излучения в видимый диапазон, а также сцинтилляторов рентгеновского излучения. Возможным способом решения проблемы повышения эффективности и разрешающей способности преобразователей различных видов излучения в видимое является синтез люминофоров в наноструктурированной матрице. В качестве такой матрицы перспективно использование пористого анодного оксида алюминия, поскольку он оптически прозрачен в видимом и инфракрасном диапазонах и имеет высокую тепловую устойчивость наряду с низкой стоимостью синтеза. Люминофоры возможно инкорпорировать в каналы матрицы золь-гель методом, а также пропиткой в растворах солей. Диаметр каналов пор анодного оксида алюминия, содержащих люминофор, может варьироваться от 30 до 200 нм. Упорядоченность открытых каналов пор, возможность изменения диаметра пор в нанометровом диапазоне, воспроизводимый рост анодного оксида и возможность формирования ксерогелей требуемого химического состава в порах позволяют создавать многофункциональные пленочные структуры для различных применений.

Разработка методов синтеза люминофоров с использованием нанопористого анодного оксида алюминия в качестве несущей матрицы, а также в виде наноструктурированных порошков и изучение механизмов возбуждения и усиления люминесценции в таких структурах является перспективной задачей для понимания особенностей взаимодействия матрицы-носителя и внедряемого люминофора, а также для создания преобразователей различного вида излучений.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Тема диссертации соответствует направлениям 6 «Электроника и фотоника», 8 «Многофункциональные материалы и технологии» и 12 «Междисциплинарные исследования» перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь №190 от 12 марта 2015 г.

Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» на базе НИЛ 4.5 «Нанофотоника» в рамках заданий государственных программ научных исследований: «Электроника», задание 1.20 «Разработать физико-технологические принципы формирования нанoeлектронных и нанофотонных приборов» (№ г. р. 20061468, 2006–2010 гг.); «Конвергенция», задание 2.2.03 «Разработать матричный

преобразователь рентгеновского излучения» (№ г. р. 20121098, 2012–2013 гг.); «Электроника и фотоника», задание 1.1.15 «Разработка научных основ и методов формирования радиационно-стойких пленок сегнетоэлектриков и поликристаллического кремния для использования в качестве элементов энергонезависимой памяти, конденсаторных структур и преобразователей рентгеновского излучения в видимое» (№ г. р. 20142224, 2014–2015 гг.); «Конвергенция», задание 2.2.06 «Разработка пленочного сцинтилляционного детектора ионизирующих излучений» (№ г. р. 20142225, 2014–2015 гг.) «Конвергенция 2020», задание 2.2.04 «Физико-химические закономерности формирования композитов в пористом анодном оксиде алюминия для возбуждения ультрафиолетовым и жестким излучением» (№ г. р. 20163869, 2016–2020 гг.), «Фотоника, опто- и микроэлектроника», задание 1.2.05 «Разработка методики синтеза анизотропных люминесцирующих двухмасштабных наноструктур и исследование их оптических свойств при различных видах возбуждения» (№ г. р. 20163735, 2016–2020 гг.).

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является установление физико-химических закономерностей формирования наноструктурированных алюмоиттриевых композитов (гранатов и перовскитов), легированных тербием, из нитрат-цитратных золь на подложках из нанопористого анодного оксида алюминия и в виде порошков, установление особенностей их структуры и люминесценции ионов тербия в таких материалах для применения в светоизлучающих элементах и конвертерах коротковолновых излучений в видимый диапазон.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести анализ состояния исследований по формированию, свойствам и перспективам применения алюмоиттриевых композитов.

2. Разработать технологию формирования алюмоиттриевого композита, легированного тербием, на подложках, содержащих нанопористый анодный оксид алюминия, и в виде порошков и выбрать методики исследования его структуры и люминесцентных свойств.

3. Установить физико-химические закономерности формирования алюмоиттриевого композита, легированного тербием, на подложках, содержащих нанопористый анодный оксид алюминия, а также в виде порошков люминофоров.

4. Проанализировать люминесцентные свойства алюмоиттриевого композита, легированного тербием, на подложках, содержащих нанопористый анодный оксид алюминия, и их связь с особенностями формирования.

5. Исследовать возможности применения алюмоиттриевых композитов, легированных тербием, в детекторах и конвертерах излучения.

В качестве объекта исследования были выбраны легированные тербием алюмоиттриевые композиты в виде пленок, синтезированных нитрат-цитратным

золь-гель методом на подложках нанопористого анодного оксида алюминия на монокристаллическом кремнии, и в виде порошков.

Предмет исследования – физико-химические свойства пленочных структур и порошков алюмоиттриевого композита, полученного золь-гель методом, и закономерности изменения его фазового состава и люминесцентных свойств инкорпорированных ионов тербия в зависимости от условий синтеза.

### **Научная новизна**

1. Зарегистрирована фото-, рентгено- и катодолюминесценция тербия при комнатной температуре в алюмоиттриевых композитах, полученных на нанопористом анодном оксиде алюминия из нитрат-цитратных растворов, характеризующаяся линейным ростом интенсивности для всех указанных видов возбуждения при увеличении концентрации тербия в исходных растворах от 0,01 до 0,25 мол. %.

2. Обнаружена стабилизация промежуточной фазы нанокристаллического  $YAlO_3$  из нитрат-цитратных золь, соответствующих по катионному составу алюмоиттриевому гранату  $Y_{2,85}Tb_xAl_5O_{12}$  ( $x = 0,01 \dots 0,25$  мол. %), в присутствии подложек, содержащих нанопористый анодный оксид алюминия.

3. В структурах легированный тербием алюмоиттриевый композит / нанопористый анодный оксид алюминия установлено перераспределение интенсивности фотолюминесценции от матрицы пористого анодного оксида алюминия (синий диапазон) к тербию (зеленый диапазон) и обратно с изменением длины волны возбуждения, а также сохранение визуализируемой собственной фотолюминесценции анодного оксида алюминия.

4. Установлено наличие двух центров люминесценции тербия в структурах алюмоиттриевый композит / нанопористый анодный оксид алюминия, соответствующих положению ионов тербия в алюмоиттриевом перовските и в материале пористой подложки.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Нанесение центрифугированием золь из водно-спиртовых растворов нитратов иттрия, алюминия, тербия и лимонной кислоты на пористый анодный оксид алюминия на кремнии и их последующая термообработка при 1000 °С сопровождаются образованием на пористом слое алюмоиттриевого композита, состоящего из легированного тербием поликристаллического ортоалюмината иттрия ( $YAlO_3:Tb$ ), в котором благодаря наноструктурированной пористой подложке стабилизирована кубическая решетка кристаллитов из этого материала, имеющих средний размер порядка 11 нм, при этом термообработка при 1000 °С таких золь без подложки приводит к формированию порошков алюмоиттриевого граната  $Y_3Al_5O_{12}:Tb$ .

2. В процессе формирования алюмоиттриевого композита, легированного тербием, на пористом анодном оксиде алюминия при 1000 °С ионы тербия

проникают на всю глубину нанометровых пор оксида алюминия протяженностью до 7 мкм, и их люминесценция, возбуждаемая ультрафиолетовым излучением с длиной волны 266 нм, характеризуется двухэкспоненциальным затуханием с временем жизни 4,8 мс, типичным для локализации ионов  $Tb^{3+}$  в кристаллической решетке ортоалюмината иттрия, и 2,0 мс, свидетельствующим об их нахождении в окружении или на поверхности оксида алюминия.

3. Интенсивность люминесценции алюмоиттриевого композита в области длин волн 360–460 нм немонотонно изменяется с увеличением содержания в нем тербия, снижаясь в диапазоне концентраций тербия 1,3–4,1 мол. % и повышаясь с увеличением его концентрации до 9,6 мол. %, что находит объяснение в рамках модели, предполагающей замену доминирующей роли кросс-релаксации с участием ионов  $Tb^{3+}$ , приводящей к тушению люминесценции при указанных низких концентрациях тербия, на ап-конверсию при его высоких концентрациях.

4. В структурах из легированного тербием алюмоиттриевого композита на нанопористом анодном оксиде алюминия при возбуждении ультрафиолетовым излучением с длиной волны 260–280 нм, рентгеновским излучением и пучком электронов с энергией 180 кэВ доминирует люминесценция ионов  $Tb^{3+}$  в зеленом диапазоне с максимумом на длине волны 545 нм, а при возбуждении ультрафиолетовым излучением с длиной волны 340 нм доминирующей становится люминесценция от оксида алюминия, что делает такие структуры перспективными для применения в конвертерах ионизирующих излучений и люминесцирующих изображений.

5. Слой анодного оксида алюминия толщиной 0,5–7 мкм с размером пор 50–150 нм на термически стойких подложках (кремний, кварцевое стекло) в сочетании с золь-гель синтезом на нем люминофора из легированного тербием алюмоиттриевого композита обеспечивает его закрепление на подложке и по сравнению со свободными мембранами из пористого оксида алюминия расширяет температурный диапазон синтеза люминофора до 1200 °С, избегая деформаций, характерных для свободных мембран, что делает возможным использование таких структур в качестве детекторов ионизирующих излучений с площадью поверхности, ограниченной лишь размером подложки.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Все основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены при непосредственном участии соискателя. Выполнение диссертационной работы потребовало различных междисциплинарных знаний и осуществлялось с участием специалистов в разных областях. Научному руководителю Н.В. Гапоненко принадлежат постановка ряда основных задач и интерпретация некоторых полученных результатов. Измерения спектров фотолюминесценции проводились в Институте физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси и Вроцлавском политехническом институте (Польша), измерение спектров рентгено- и катодолюминесценции – в Уральском федеральном университете им. Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация), исследования морфологии образцов – при

участии специалистов ГЦ «Белмикроанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющей компании холдинга «ИНТЕГРАЛ». Автор выражает благодарность доктору А. Подгородецкому (Польша), профессору В. С. Кортову и профессору В. А. Пустоварову (Российская Федерация), инженерам-технологам Т. И. Ореховской и М. В. Мелединой.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты исследований, включенные в диссертацию, докладывались на следующих международных и республиканских конференциях: Республиканской научной конференции студентов и аспирантов Республики Беларусь «НИРС-2011» (Минск, Беларусь, 18 октября 2011 г.), Первом Международном симпозиуме и выставке пористых и порошковых материалов «PRM'2013» (Чешме, Измир, Турция, 3–6 сентября 2013 г.), IX Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (Санкт-Петербург, Россия, 7–10 июля 2014 г.), IV Международной научной конференции «Наноструктурные материалы – 2014: Беларусь – Россия – Украина» НАНО-2014 (Минск, Беларусь, 7–10 октября 2014 г.), VI Международной конференции «Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии» ИСМАРТ–2014 (Минск, Беларусь, 12–16 октября 2014 г.), II Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2015» (Зеленоград, Москва, Россия, 22–24 апреля 2015 г.), Международной конференции «Nanomeeting-2015» (Минск, Беларусь, 26–29 мая 2015 г.), X Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (Санкт-Петербург, Россия, 4–7 июля 2016 г.), XI Международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (Минск, Беларусь, 14–16 сентября 2016 г.).

### **Опубликование результатов диссертации**

По материалам диссертации опубликовано 25 печатных работ: 10 статей в рецензируемых научных изданиях (объемом 4,3 авторского листа), 6 статей в сборниках материалов международных конференций, 8 тезисов докладов, получен 1 патент на полезную модель. Общий объем опубликованных печатных работ составляет 5,8 авторского листа.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложения.

Общий объем диссертационной работы составляет 136 страниц, из них 90 страниц основного текста, 51 рисунок на 18 страницах, 7 таблиц на 4 страницах, библиография из 186 наименований, включая 25 публикаций автора, на 16 страницах и 1 приложение на 4 страницах.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении и общей характеристике работы** обоснована актуальность темы диссертации, показана связь работы с научными программами и темами, сформулированы цель и задачи исследований, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, сформулированы положения диссертации, выносимые на защиту. Приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации, их опубликовании, а также о структуре и объеме диссертации.

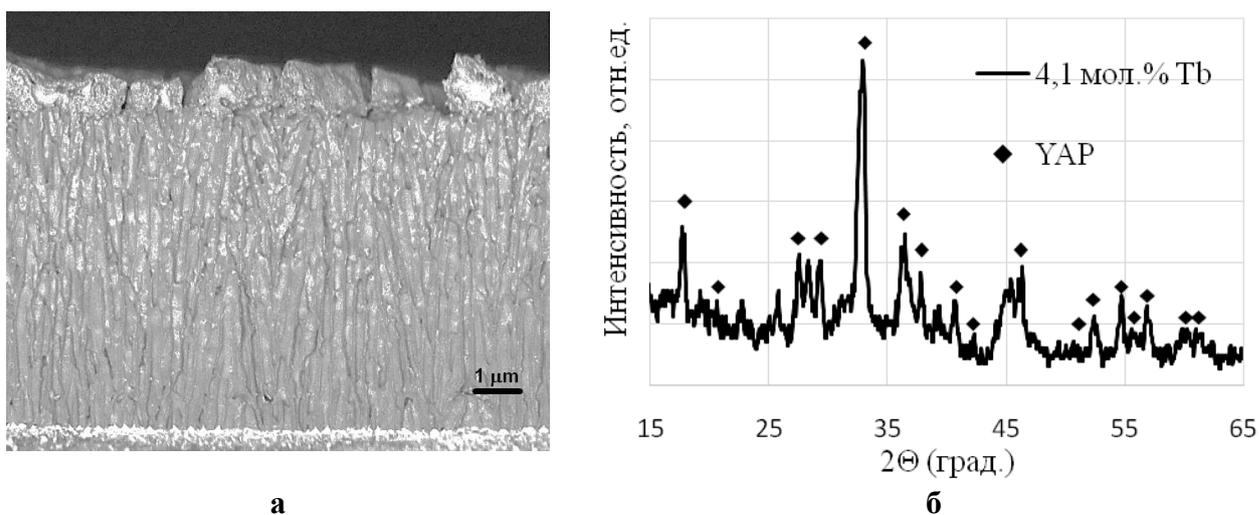
**Первая глава** содержит обзор литературы, включающий основные сведения о золь-гель процессе, методиках получения золь-гель методом легированных лантаноидами алюмоиттриевых композитов, особенностях фазообразования алюмоиттриевых композитов (АИК), свойствах пористого анодного оксида алюминия (ПАОА) и его преимуществах как матрицы для синтеза оптически активных материалов, сведения по основам спектроскопии редкоземельных элементов. Показана перспективность разработки методик синтеза и анализа люминесценции в структурах легированный лантаноидами ксерогель / ПАОА для создания конвертеров излучения и люминесцирующих изображений.

Во **второй главе** изложены методики приготовления экспериментальных образцов и методы исследования их свойств.

Для получения зольей, соответствующих катионному составу алюмоиттриевых гранатов  $Y_{2.85}Tb_xAl_5O_{12}$ , в качестве исходных компонентов использовали нитраты иттрия  $Y(NO_3)_3$  и алюминия  $Al(NO_3)_3$ , в качестве легирующей добавки – нитрат тербия  $Tb(NO_3)_3$ , растворителей – спиртоводную ( $C_2H_5OH:H_2O = 6:1$ ) смесь и разбавленную азотную кислоту ( $HNO_3$ ). В качестве стабилизирующего золь компонента добавляли лимонную кислоту с мольным соотношением [металл-ионы]: $[C_6H_8O_7] = 1:3$ . Мольное соотношение  $Y^{3+}/Al^{3+}$  для всех растворов 1,76; pH раствора поддерживался равным 1. Концентрация тербия в полученных растворах составляла 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.20, 0.25 мол. % (концентрация  $Tb^{3+}$  в композите составляет соответственно 0.4, 1.3, 2.1, 2.9, 4.1, 7.8 и 9.6 мол. %). Такие растворы оставались стабильными до трех лет, не наблюдалось гелирования, выпадения осадка, помутнения. Полученные растворы наносили на подложки нанопористого анодного оксида алюминия размером пор 100–150 нм на кремнии центрифугированием, а также использовали для получения порошков.

В **третьей главе** приведены результаты исследования физико-химических закономерностей формирования фаз легированных тербием АИК из нитрат-цитратных зольей при нанесении их на подложки, содержащие ПАОА, и при формировании порошков. По данным энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии содержание тербия в полученной пленке алюмоиттриевого

композита в ПАОА коррелирует с мольной концентрацией тербия в растворе и составляет от 0,07 до 2,11 ат. %. По результатам рентгенодифракционного анализа средний размер кристаллитов в пленках алюмоиттриевого композита на пористом анодном оксиде алюминия составляет 11 нм, в порошке алюмоиттриевого граната – 40 нм. На рисунке 1 приведена полученная методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) фотография алюмоиттриевого композита, легированного тербием, сформированного на нанопористом анодном оксиде алюминия на кремниевой пластине, и дифрактограмма того же образца с отчетливо разрешаемыми пиками, характерными для кубической фазы ортоалюмината иттрия и пленки оксида алюминия на подложке.



а – СЭМ-изображение пленки на ПАОА; б – дифрактограмма (YAP – рефлексы, соответствующие кубическому  $YAlO_3$ )

Рисунок 1. – Результаты исследования структуры алюмоиттриевый композит / нанопористый анодный оксид алюминия

Формирование фазы ортоалюмината иттрия  $YAlO_3$  подтверждено ИК-спектроскопией: полосы поглощения в ИК-спектрах на 783, 717, 682  $cm^{-1}$  связаны с валентными колебаниями тетраэдра  $AlO_4$ , а полосы на 564, 510, 499 и 427  $cm^{-1}$  – октаэдра  $AlO_6$ , характерными для кубической фазы  $YAlO_3$ . Дифрактограмма порошка из золя аналогичного состава соответствует рентгеновскому спектру граната. Предложенная феноменологическая модель формирования и стабилизации промежуточной для данной системы фазы кубического  $YAlO_3$ , легированного тербием, в присутствии подложки пористого анодного оксида алюминия, основана на образовании кубической фазы гамма-оксида алюминия и последующем формировании кубического ортоалюмината иттрия в присутствии избытка кристаллизованного оксида алюминия. Компьютерное моделирование параметров решетки  $YAlO_3$  демонстрирует сохранение кубической сингонии и тенденцию к увеличению объема элементарной ячейки при замещении алюминия иттрием. Порошки, получаемые из нитрат-цитратного раствора, кристаллизуются в отсутствие нанопористого анодного оксида алюминия в ожидаемой фазе граната  $Y_3Al_5O_{12}$ .

В четвертой главе представлен анализ люминесценции структур, легированный тербием алюмоиттриевый композит / ПАОА при различных видах возбуждения. В структурах  $YAlO_3:Tb^{3+}/ПАОА$  наблюдается характерная фотолюминесценция (ФЛ) тербия при комнатной температуре при возбуждении ультрафиолетовым (УФ) излучением, рентгеновским излучением и пучком электронов. Полосы с максимумами на 493, 544, 584 и 620 нм, связаны с излучательными переходами с уровня  $^5D_4$  на уровни  $^7F_J$  ( $J = 6, 5, 4, 3$ ) ионов  $Tb^{3+}$  (рисунок 2, а). Дополнительно для образцов с низкой концентрацией тербия при возбуждении УФ излучением наблюдаются три слабые линии излучения в области 350...450 нм, связанные с переходами с уровней  $^5D_3$  и  $^5G_6$  на уровни  $^7F_J$  трехвалентных ионов тербия. Для всех исследуемых образцов в спектре возбуждения люминесценции (рисунок 2, б) наблюдаются полосы, связанные с  $f-f$  и  $f-d$ -переходами трехвалентных ионов тербия.

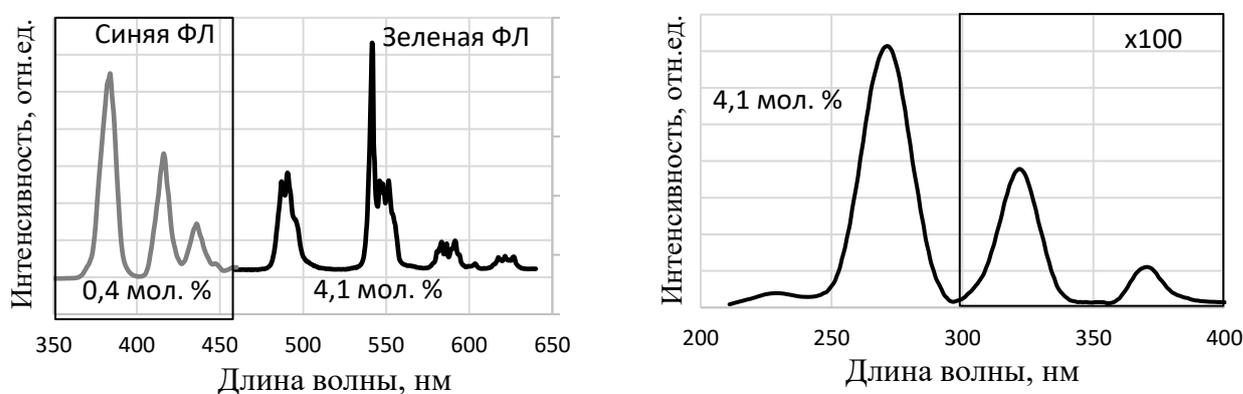
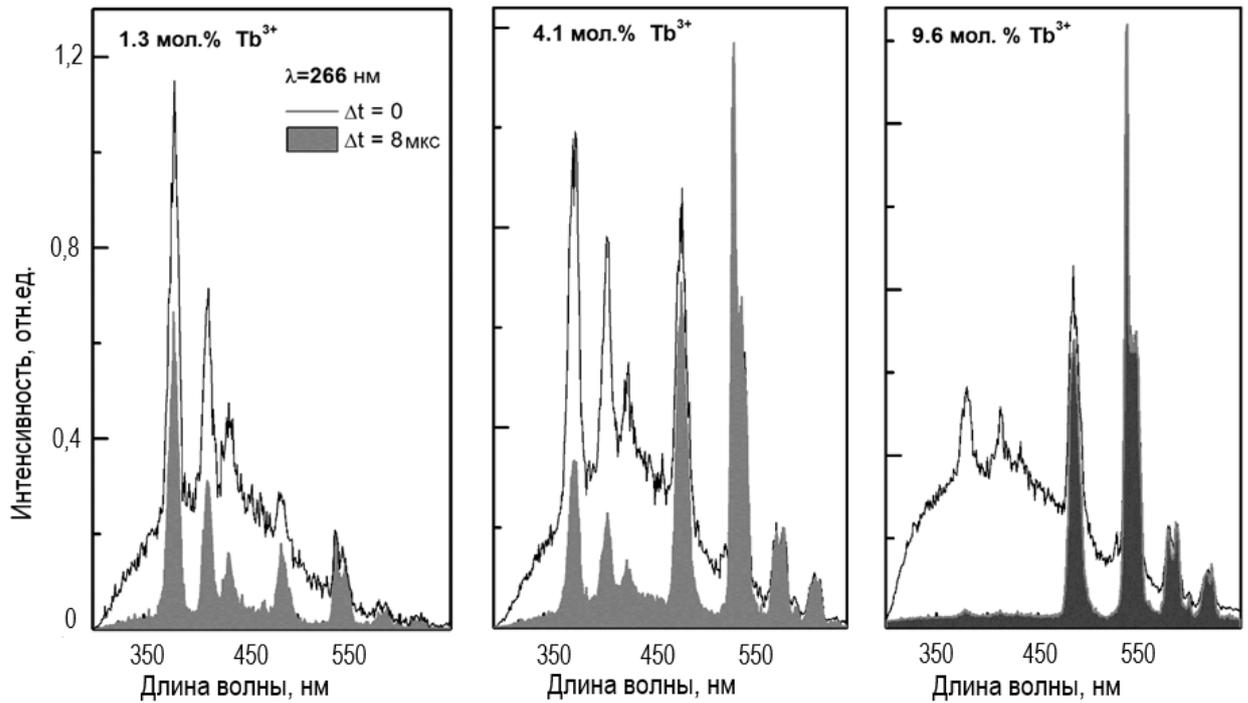


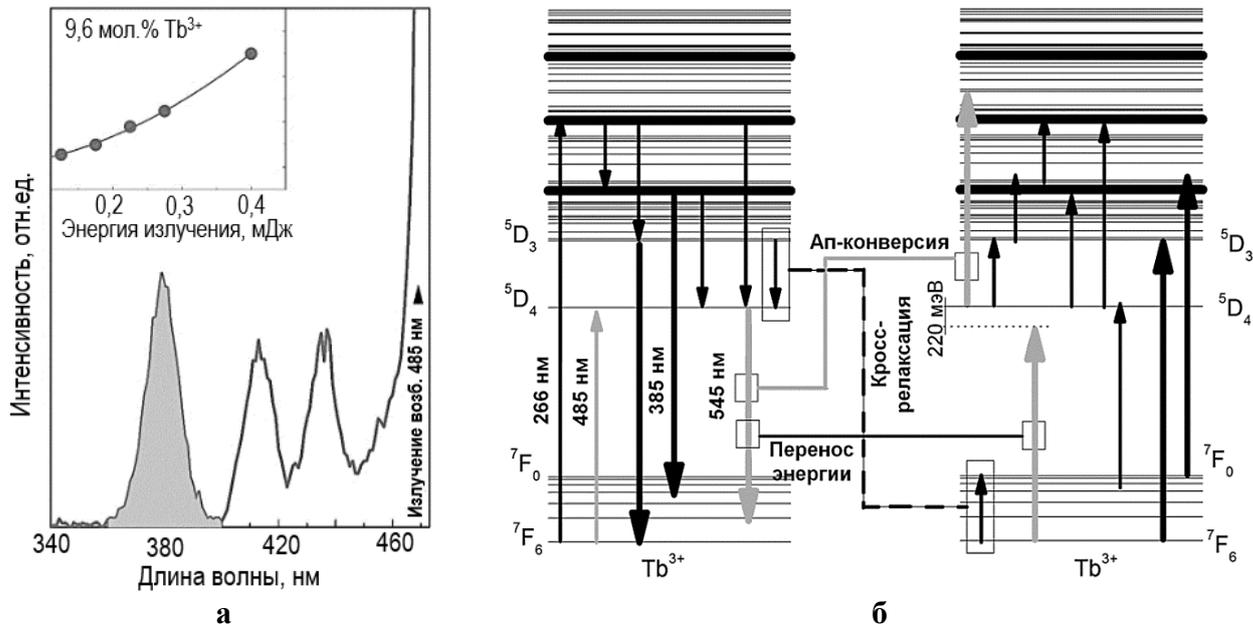
Рисунок 2. – Спектры ФЛ (а) и возбуждения ФЛ (б) структуры  $YAlO_3:Tb^{3+}/ПАОА$  с различной концентрацией тербия

Для анализа особенностей межионного взаимодействия и влияния дефектов на люминесценцию структур  $YAlO_3:Tb^{3+}/ПАОА$  зарегистрированы спектры ФЛ с временным разрешением – непосредственно после лазерного импульса, а также через 8 мкс (рисунок 3). Для всех образцов наблюдается появление широкой полосы ФЛ в синей области спектра непосредственно после импульса, обусловленной наличием в структуре ПАОА кислородных вакансий (F-центров и  $F^+$ -центров), частично совпадающей с синей ФЛ ионов тербия, однако, отличающейся малым временем жизни. При низкой концентрации тербия сразу после окончания возбуждающего импульса в спектре доминирует синяя люминесценция, тогда как при повышении концентрации тербия до 9,6 мол.% наблюдаемая люминесценция имеет наибольшую интенсивность в зеленом диапазоне. При средней концентрации (4,1 мол. %) обе полосы в спектре имеют приблизительно одинаковую интенсивность. Снижение интенсивности синей люминесценции за счет переходов с уровней  $^5G_6$  и  $^5D_3$  с увеличением концентрации ионов тербия свидетельствует о том, что эффективное ион-ионное взаимодействие способствует кросс-релаксации, то есть безызлучательным переходам носителей с уровней  $^5G_6$  и  $^5D_3$  на уровень  $^5D_4$  с передачей энергии соседним ионам тербия, находящимся в основном состоянии, при этом возрастает интенсивность зеленой люминесценции.



**Рисунок 3. – Фотолюминесценция в момент возбуждения и с временной задержкой 8 мкс для трех концентраций тербия**

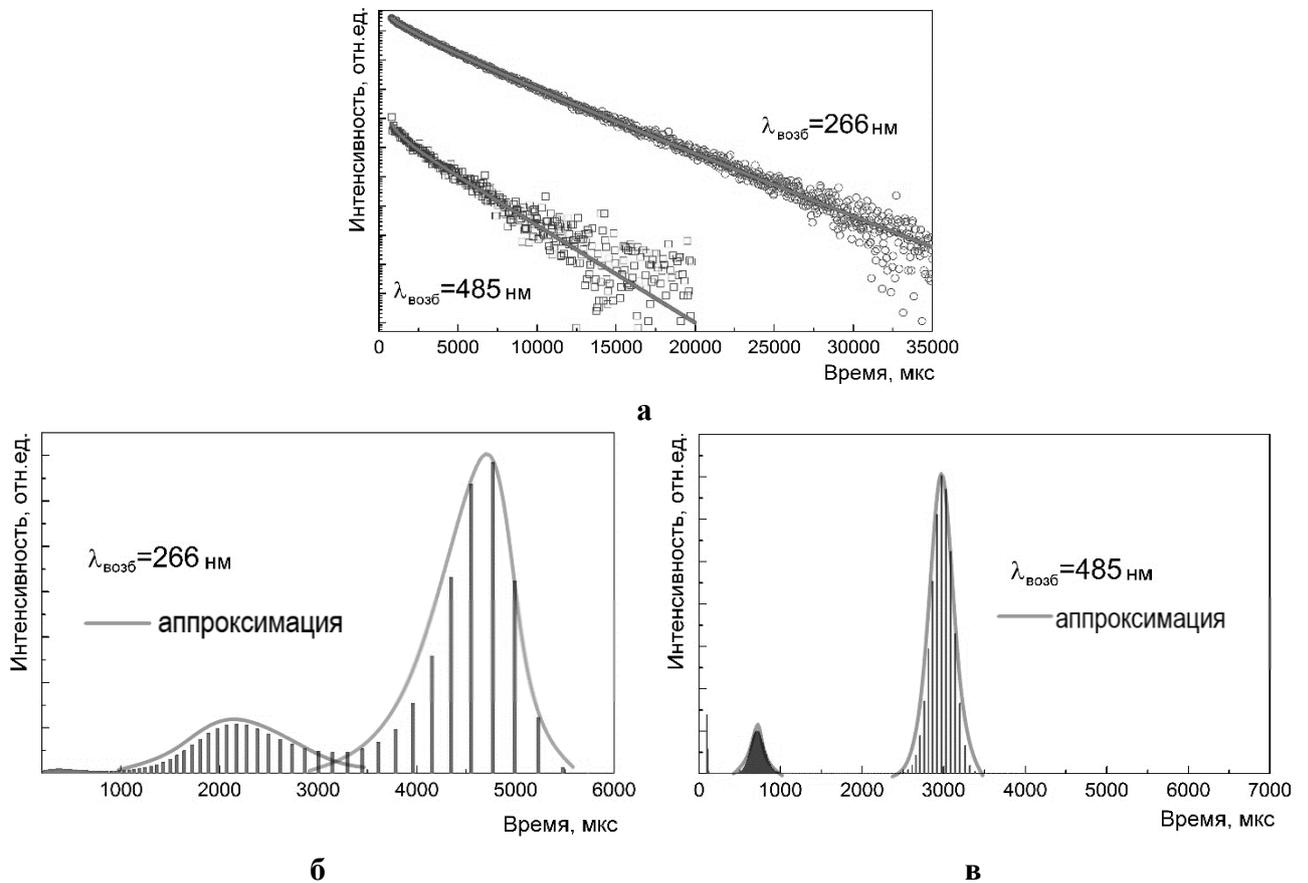
На рисунке 4 представлены спектры ФЛ в области 360–460 нм (длина волны возбуждения 485 нм) и интенсивности основной полосы на 380 нм при различных энергиях возбуждающего излучения для образцов с наибольшей концентрацией тербия (9,6 мол. %).



**Рисунок 4. – Спектр ап-конверсии (а) образца, содержащего 9,6 мол. % (2,11 ат. %)  $Tb^{3+}$ , на длине волны возбуждения 485 нм (на вставке показана интегральная интенсивность основной полосы 380 нм как функция мощности возбуждающего излучения) и схема уровней энергии с указанием основных переходов и механизмов межионного взаимодействия  $Tb^{3+}$  (б)**

Основные механизмы межионного взаимодействия  $Tb^{3+}$  представлены на рисунке 4, б. Наличие ап-конверсионной люминесценции даже при низких энергиях возбуждающего излучения ( $\sim 0,1$  мДж) свидетельствует о возможности участия ап-конверсии, инициируемой интенсивной зеленой люминесценцией при возбуждении излучением с длиной волны 266 нм, в тушении люминесценции  $Tb^{3+}$  при повышении его концентрации в пленке ортоалюмината иттрия на ПАОА.

Для получения детальной информации о локализации люминесцирующих ионов в структуре матрицы, исследованы кинетики затухания люминесценции структуры. Кривые затухания ФЛ вместе с аппроксимирующими кривыми для структуры  $YAlO_3:Tb^{3+}/ПАОА$ , содержащей 4,1 мол. %  $Tb$ , представлены на рисунке 5, а. Для более точного представления информации данные по затуханию люминесценции были проанализированы с применением метода максимума энтропии (ММЭ), результаты представлены на рисунке 5, б, в.



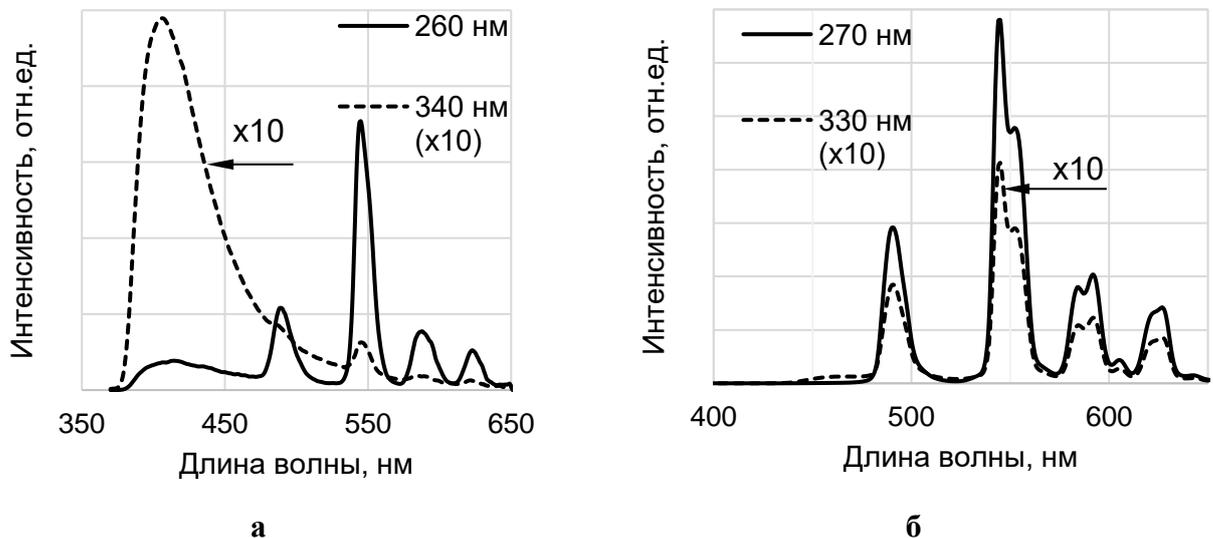
**Рисунок 5. – Затухание люминесценции, измеренное для структуры  $YAlO_3:Tb^{3+}$  с концентрацией тербия 4,1 мол. % для двух длин волн возбуждения: 266 и 485 нм (а) и ММЭ-распределение времени затухания люминесценции, полученное для возбуждения на 266 нм (б) и 485 нм (в)**

Затухание люминесценции для двух длин волн возбуждения 266 и 485 нм является двухэкспоненциальным и описывается функцией вида:

$$I_{PL}(t) = \sum A_i \exp(-t / \tau_i), \quad (1)$$

где  $i=2$ , что соответствует присутствию двух компонент затухания ФЛ – более быстрой и более медленной, размерность которых порядка тысяч микросекунд. Среднее время жизни для медленной компоненты составляет 4,8 мс, что соответствует положению иона тербия в нанокристаллическом ортоалюминате иттрия  $YAlO_3$ , для быстрой – порядка 2 мс, что характерно для ионов, осажденных пропиткой в ПАОА.

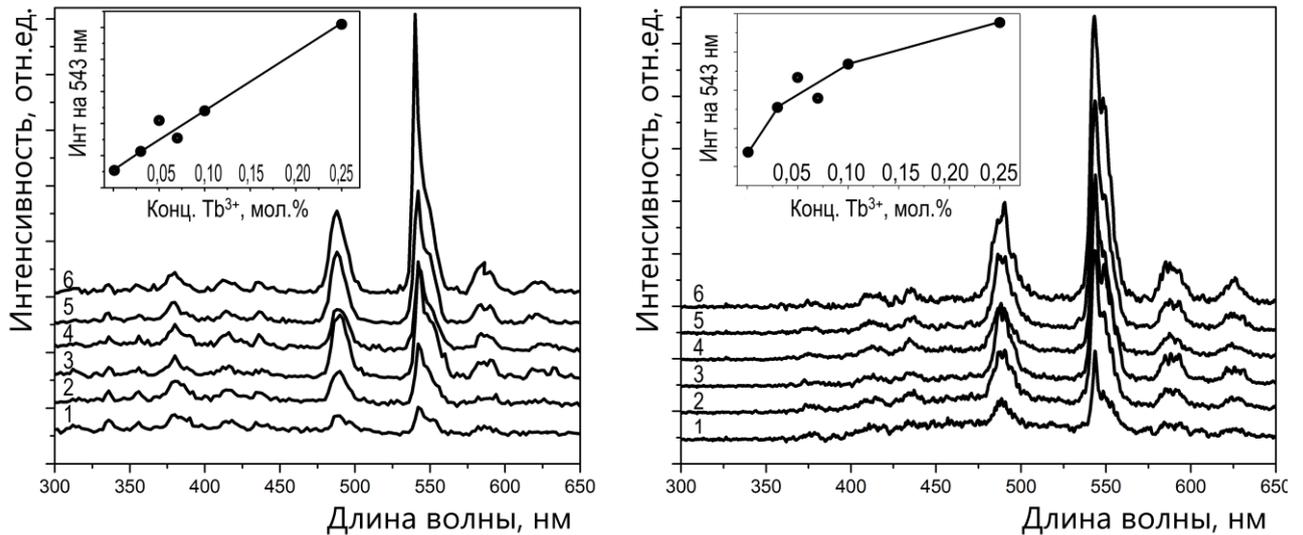
Для структур  $YAlO_3$ /ПАОА с увеличением длины волны возбуждающего УФ-излучения от 260 до 340 нм наблюдается рост интенсивности широкой полосы люминесценции в синем диапазоне, связанной с собственной ФЛ пленки ПАОА, при одновременном уменьшении интенсивности полос люминесценции тербия в диапазоне 480–650 нм (рисунок 6, а). Максимальная интенсивность описываемой синей полосы соответствует длине волны возбуждения 340 нм, что свидетельствует о возбуждении люминесценции непосредственно матрицы ПАОА, поскольку данная длина волны не попадает в интервал, соответствующий эффективному возбуждению тербия. Аналогичное исследование для порошка  $Y_3Al_5O_{12}:Tb$  показало снижение интенсивности ФЛ основного пика с максимумом 545 нм (переход  $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ ) при увеличении длины волны возбуждения с 270 до 330 нм (рисунок 6), при этом, остальные полосы ФЛ с максимумами 493, 584 и 620 нм, связанные с излучательными переходами с уровня  $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$ ,  $^5D_4 \rightarrow ^7F_4$  и  $^5D_4 \rightarrow ^7F_3$  ионов  $Tb^{3+}$  соответственно, убывают пропорционально интенсивности основной полосы (рисунок 6, б).



**Рисунок 6.** – Спектры ФЛ, зарегистрированные для структур  $YAlO_3$ /ПАОА (а) и порошка  $Y_3Al_5O_{12}$  (б), полученных из золя с концентрацией тербия 0,10 мол. %, при различных длинах волн возбуждения

Спектры рентгено- и импульсной катодолюминесценции (РЛ и ИКЛ соответственно) представлены на рисунке 7. В спектрах в диапазоне 450 – 600 нм наблюдаются интенсивные полосы люминесценции, которые относятся к переходам с уровня  $^5D_4$ : 490 нм (переход  $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$ ), 543 нм (переход  $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ ), 592 нм (переход  $^5D_4 \rightarrow ^7F_4$ ). Также для максимальной концентрации тербия в спектре катодолюминесценции статистически достоверной становится линия

с максимумом 628 нм (переход  $^5D_4 \rightarrow ^7F_3$ ) и полосы в синем диапазоне 380 и 413 нм, зарегистрированные при возбуждении рентгеновским излучением, которые относятся к переходам с уровня  $^5G_6$  на нижележащие уровни мультиплетного термина  $^7F_J$ :  $^5G_6 \rightarrow ^7F_6$ ,  $^5G_6 \rightarrow ^7F_5$ . Наблюдается рост интенсивности РЛ и ИКЛ в зеленом диапазоне с увеличением концентрации тербия (на вставках рисунка 7, а, б).



**а** **б**  
 1 – 0.01 мол. %, 2 – 0.03 мол. %, 3 – 0.05 мол. %, 4 – 0.07 мол. %, 5 – 0.1 мол. %, 6 – 0.25 мол. % Tb<sup>3+</sup> в исходном растворе

**Рисунок 7.** – Спектры РЛ (а) и ИКЛ (б) и зависимость интенсивности РЛ и ИКЛ (на вставках а и б соответственно) на длине волны 543 нм от концентрации тербия, полученные для структур YAlO<sub>3</sub>:Tb/PAOA

В пятой главе предложены возможные варианты использования исследованных алюмоиттриевых композитов и пленок PAOA в преобразователях ионизирующего излучения. Анализ ФЛ тербия в пленках PAOA, осажденного пропиткой из растворов солей, показывает, что ионы тербия в аморфной матрице анодного оксида алюминия и алюмогеля демонстрируют характерную для тербия люминесценцию с максимумом вблизи 545 нм, при этом основная полоса возбуждения ФЛ находится в области 300–350 нм, характерной для пористого оксида алюминия и аморфного ксерогеля Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Описан вариант запатентованной конструкции матричного преобразователя ионизирующего излучения на основе структуры нанопористый анодный оксид алюминия/кремний с ксерогелем алюмоиттриевого композита, легированного тербием, располагающимся в виде сплошной пленки на поверхности анодного оксида и закрывающим устья его пор.

Предложена методика низкотемпературного синтеза люминофоров диспергированием легированного тербием монофазного порошка алюмоиттриевого граната в золе диоксида титана. Сформированы люминесцентные пленки на микроструктурированной алюминиевой фольге (рисунок 8).

Предложенный метод диспергирования порошков в золях может быть применен для формирования люминофоров широкого оптического диапазона за

счет выбора ионов лантаноидов, дальнейшее совершенствование метода даст возможность повышать однородность покрытия и формировать люминесцентные изображения и пленочные конвертеры излучения с заданным рисунком.

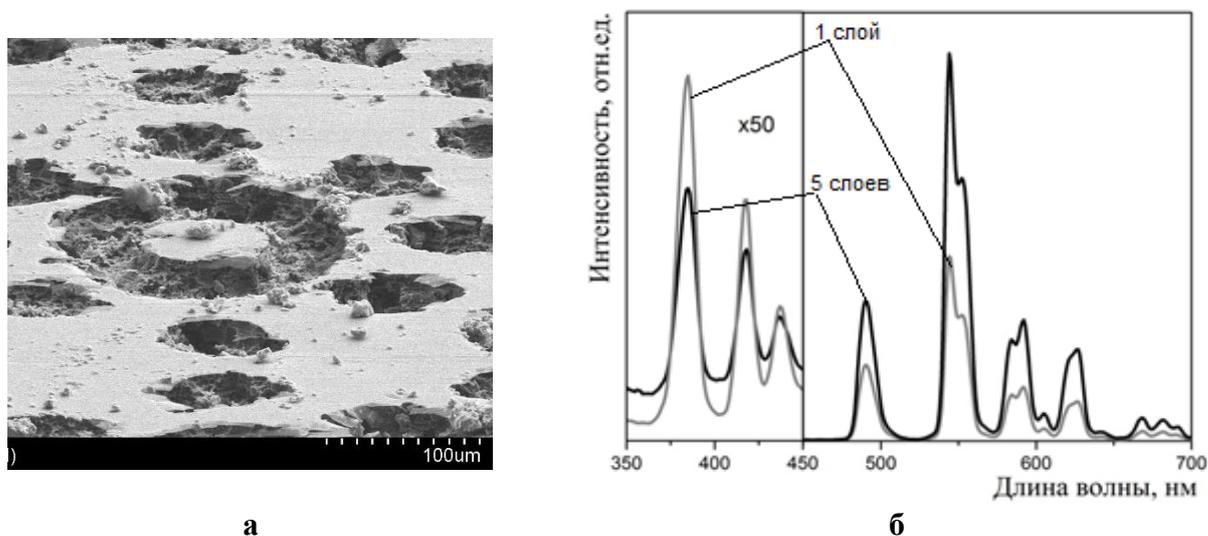


Рисунок 8. – Фотография (а) 1-слойной пленки и спектры люминесценции (б) синтезированных пленок  $\text{TiO}_2/\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Tb}$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Послойное нанесение центрифугированием нитрат-цитратных золь на пористый анодный оксид алюминия с размером пор 100–150 нм на кремнии и их последующая термообработка при 1000 °С приводит к формированию легированного тербием ортоалюмината иттрия  $\text{YAlO}_3$  со средним размером кристаллитов 11 нм, что подтверждается данными рентгеновской дифракции и ИК-спектроскопии. Полученные структуры  $\text{YAlO}_3:\text{Tb}^{3+}$ /пористый анодный оксид алюминия демонстрируют при комнатной температуре фото-, катодо- и рентгенолюминесценцию тербия. Наиболее интенсивная люминесценция трехвалентных ионов тербия, обусловленная переходом  $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$ , с максимумом вблизи 545 нм для всех видов возбуждения наблюдается для концентрации тербия не ниже 2 ат. % [4, 5, 7, 12–15, 23].

2. Для ионов  $\text{Tb}^{3+}$  в структурах  $\text{YAlO}_3$ / пористый анодный оксид алюминия характерно двухэкспоненциальное затухание фотолюминесценции с временами жизни 4,8 и 2,0 мс для двух центров люминесценции – ионов, включенных в алюмоиттриевый композит и в пористую оксидную подложку соответственно. Люминесценция тербия в структурах  $\text{YAlO}_3$ / пористый анодный оксид алюминия с ростом концентрации тербия в диапазоне от 0,07 до 0,87 ат. % демонстрирует снижение интенсивности синей полосы фотолюминесценции при одновременном увеличении интенсивности зеленой полосы фотолюминесценции, что характерно для кросс-релаксации трехвалентных ионов тербия. Тушение зеленой

фотолюминесценции для длины волны возбуждения 485 нм, наблюдаемое для высоких концентраций тербия (2,11 ат. %), объясняется ап-конверсией, приводящей к росту люминесценции в области 380 нм и наблюдающейся при энергии возбуждающего излучения менее 1 мДж [3–5, 15].

3. В структурах легированный тербием алюмоиттриевый композит/пористый анодный оксид алюминия происходит перераспределение интенсивности фотолюминесценции от матрицы анодного оксида (синий диапазон) к тербию в ксерогеле (зеленый диапазон) и обратно с изменением длины волны возбуждения от 340 до 260 нм. Максимальная интенсивность синей полосы фотолюминесценции наблюдается при длине волны возбуждения 340 нм, что подтверждает возбуждение люминесценции матрицы пористого анодного оксида алюминия [7, 8, 11].

4. Использование в качестве подложек для синтеза люминофоров золь-гель методом слоев пористого анодного оксида алюминия позволяет получать композитные люминофоры, формирование которых на гладких подложках не представляется возможным ввиду свойств золь, например, при нитрат-цитратном синтезе, и при осаждении лантаноидов из растворов солей. ПАОА на кремнии позволяет получать люминесцентные структуры большего размера и при более высоких температурах отжига (до 1200 °С) в отличие от синтеза в свободных мембранах из ПАОА [1–5, 8, 9, 11, 16–20, 25].

5. Постадийный нагрев нитрат-цитратных золь с тербием до 1000 °С позволяет получать порошки алюмоиттриевого граната  $Y_3Al_5O_{12}$  со средним размером кристаллитов 40 нм, демонстрирующие ФЛ тербия при комнатной температуре. Установлено сохранение фазового состава порошка и ФЛ тербия в нем после диспергирования порошка в золе оксида титана, и показана возможность формирования люминесцентных структур на ПАОА с заданной конфигурацией поверхности как непосредственно из золь, так и из содержащих порошок суспензий [6, 10, 21, 22, 24].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Регистрируемое перераспределение интенсивности излучения для легированной тербием структуры алюмоиттриевый композит/пористый анодный оксид алюминия от матрицы пористого анодного оксида алюминия (синий диапазон) к тербию (зеленый диапазон) и обратно с изменением длины волны возбуждения может найти практическое применение при разработке защитных изображений на алюминии с изменяющимся цветом люминесценции в зависимости от длины волны возбуждения.

2. Результаты исследования люминесценции ионов тербия в различном кристаллическом окружении и сведения о возможных механизмах тушения люминесценции за счет ион-ионного взаимодействия в исследованных структурах будут полезны при разработке и создании конвертеров ионизирующего излучения и люминофоров на основе алюмоиттриевых композитов, легированных тербием.

3. Предложенная методика формирования пленочных структур алюмоиттриевый композит / пористый анодный оксид алюминия перспективна

для пленочных конвертеров ионизирующего излучения, а синтез рентгенолюминофоров в микро- и наноструктурированных квазиупорядоченных матрицах (в частности, в пористом анодном оксиде алюминия) интересен для задач одиночного координатного детектирования ионизирующих частиц, а также для повышения разрешающей способности рентгеновских изображений.

4. Создание микротекстурированных пленок ПАОА и алюминиевой фольги с применением золь-гель синтеза, фотолитографии и химического травления позволяет получать подложки с заданной конфигурацией поверхности, синтез люминесцентных покрытий на которых может адаптировать такие структуры под конкретную прикладную задачу оптоэлектроники, такую как создание волноводных структур и оптических резонаторов микронного масштаба.

5. Порошки люминофоров, содержащие ионы лантаноидов, могут использоваться как люминесцентная добавка в ксерогелях низкотемпературного формирования для получения люминесцентных изображений.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. Степанова (Хорошко), Л. С. Люминесценция тербия, осажденного в пленки пористого анодного оксида алюминия / Л. С. Степанова (Хорошко) [и др.] // Доклады БГУИР. – 2010. – № 6 (52). – С. 85–89.

2. Inhomogeneous nanostructured honeycomb optical media for enhanced cathodo- and under x-ray luminescence / N. V. Gaponenko, V. S. Kortov, M. V. Rudenko, V. A. Pustovarov, S. V. Zvonarev, A. I. Slesarev, I. S. Molchan, G. E. Thompson, L. S. Khoroshko, S. Ya. Prislipskii // Journal of Applied Physics. – 2012. – № 111. – P. 103101-1–10101-6.

3. Green emission from barium-strontium titanate matrix introduced into nanoporous anodic alumina / A. Podhorodecki, N. V. Gaponenko, M. Banski, M. V. Rudenko, L. S. Khoroshko, A. Sieradzki, J. Misiewicz // Optical Materials. – 2012. – Vol. 34. – P. 1570–1574.

4. Ion-ion interaction in two-dimensional nanoporous alumina filled with cubic  $YAlO_3:Tb^{3+}$  matrix / A. Podhorodecki, N. V. Gaponenko, G. Zatoryb, I. S. Molchan, M. Motyka, J. Serafinczuk, L.W. Golacki, L. S. Khoroshko, J. Misiewicz, G. E. Thompson // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2013. – Vol. 46. – P. 355302-1–355302-12.

5. Thermal Tb emission quenching in  $YAlO_3$  matrix embedded in porous anodic alumina / L.W. Golacki, N. V. Gaponenko, L. S. Khoroshko, A. M. Asharif, J. Misiewicz, A. Podhorodecki // Optical Materials. – 2014. – Vol. 37. – P. 200–203.

6. Khoroshko, L. S. Two-dimensional porous anodic alumina for optoelectronics and photocatalytic application / L. S. Khoroshko // J. Phys.: Conf. Series. – 2015. – Vol. 643. – P. 012110-1–012110-5.

7. Khoroshko, L. S. X-Ray-, Cathodo-, and Photoluminescence of Yttrium–Aluminum Composites on Porous Anodic Alumina Films / L.S. Khoroshko [et al.] // *Journal of Applied Spectroscopy*. – 2016. – Vol. 83, Iss. 3. – P. 358–361.

### Статьи в других рецензируемых научных изданиях

8. Люминесценция и спектроскопия возбуждения в структурах, сформированных на основе пористого анодного оксида алюминия / И. А. Николаенко, Т. И. Ореховская, Л. С. Степанова (Хорошко), М. В. Руденко, К. В. Артемьева, А. М. Ашариф, Н. В. Гапоненко, А. В. Мудрый // *Доклады БГУИР*. – 2011. – № 3 (57). – С. 92–97.

9. Хорошко, Л. С. Формирование легированных лантаноидами иттрий-алюминиевых композитов на различных подложках / Л. С. Хорошко [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / редкол.: С.А. Астапчик (гл.ред.) [и др.]*. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2016. – Кн.1 : Материаловедение. – С. 233–238.

10. Хорошко, Л. С. Золь-гель синтез и люминесценция пленочных структур, содержащих иттрий-алюминиевый гранат, легированный тербием / Л. С. Хорошко [и др.] // *Доклады БГУИР*. – 2017. – № 104 (2). – С. 58–62.

### Материалы конференций

11. Степанова (Хорошко), Л. С. Люминесцентные структуры на основе пористого анодного оксида алюминия / Л.С. Степанова (Хорошко) [и др.] // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (CriMiCo-2011) : материалы 21-й Междунар. Крымской конф., Севастополь, 12–16 сентября 2011 г. : в 2 т. / Севастополь, 2011 – Т.2. – С. 759-760.*

12. Enhanced photo- and under X-ray luminescence from xerogels embedded in mesoporous anodic alumina / N. Gaponenko, V. Kortov, V. Pustovarov, L. Khoroshko, M. Rudenko, A. Asharif, I. Molchan, G. Tompson, A. Podhorodecki, J. Misevich, S. Prislopskii // *The 1<sup>st</sup> International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition : proceedings of the PPM'2013, Çeşme, Izmir, Turkey, September 3–6, 2013 / Üç Adım Printing House : ed. by S. Kilik Ozdemir [et al.]*. – Izmir, 2013. – P. 656–658.

13. Рентгенолюминесценция тербия в композите  $YAlO_3$ , осажденном в пористый анодный оксид алюминия / Н. В. Гапоненко, В. С. Кортков, В. А. Пустоваров, Л. С. Хорошко, А. М. Ашариф, И. С. Молчан, Дж. Е. Томпсон, А. Подгородецки, Г. Затруб, Я. Мисевич // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (CriMiCo-2013): материалы 23-й Междунар. Крымской конф., Севастополь, 8–13 сентября 2013 г. : в 2 т. / Севастополь, 2013. – Т. 2. – С. 857–858.*

14. Хорошко, Л. С. Рентгено- и катодолюминесценция алюмоиттриевых композитов, легированных тербием, в пористом анодном оксиде алюминия / Л. С. Хорошко [и др.] // *Аморфные и микрокристаллические полупроводники : сб.*

тр. IX Междунар. конф., Санкт-Петербург, 7–10 июля 2014 г. / СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2014. – С. 280-281.

15. Фотолюминесценция алюмоиттриевых композитов, легированных тербием с различной концентрацией / А. Подгородецки, Я. Мисевич, Н. В. Гапоненко, Л. С. Хорошко // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (CriMiCo-2014): материалы 24-й Междунар. Крымской конф., Севастополь, 7–13 сентября 2014 г. : в 2 т. / Севастополь, 2014. – Т. 2. – С. 783–784.

16. Фотолюминесценция структур с ксерогелем алюмоиттриевого граната, легированного европием / М. В. Руденко, Л. С. Хорошко, Х. К. Вильегас Брито, Е. Б. Чубенко, К. С. Сукалин, Н. В. Гапоненко // Аморфные и микрокристаллические полупроводники : сб. тр. X Междунар. конф., Санкт-Петербург, 4–7 июля 2016 г. / СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2016. – С. 242–243.

### Тезисы докладов на научных конференциях

17. Степанова (Хорошко), Л. С. Люминесцентные структуры на основе пористого анодного оксида алюминия / Л. С. Степанова (Хорошко) [и др.] // Технические средства защиты информации : тез. докл. VIII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Браслав, 24-26 мая 2010 г. / БГУИР. – Минск, 2010. – С. 79.

18. Степанова (Хорошко), Л. С. Фотолюминесценция лантанидов в ксерогелях, сформированных в пористом анодном оксиде алюминия / Л. С. Степанова (Хорошко), Н. В. Гапоненко, А. А. Позняк // НИРС-2011: тез. докл. Респ. науч. конф. студентов и аспирантов Республики Беларусь, Минск, 18 октября 2011. – Минск, 2011 – с. 17.

19. Хорошко, Л. С. Формирование люминесцентных структур на пористом анодном оксиде алюминия для оптоэлектроники и дисплейных технологий / Л. С. Хорошко [и др.] // Технические средства защиты информации: тез. докл. XI Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 5–6 июня 2013 г. / БГУИР. – Минск, 2013. – С. 79.

20. Хорошко, Л. С. Люминесцентные пленочные структуры на основе пористого анодного оксида алюминия / Л. С. Хорошко // Лашкаревские чтения – 2013 : конф. молодых ученых с междунар. участием, Киев, 2–4 мая 2013 г. : тез. докл. / Едельвейс, 2013 – С. 78–80.

21. Хорошко, Л. С. Пленочные структуры, сформированные с использованием анодирования, золь-гель синтеза и фотолинтографии, для применения в оптоэлектронике / Л. С. Хорошко // Лашкаревские чтения – 2014 : конф. молодых ученых с междунар. участием, Киев, 2–4 апреля 2014 г. : тез. докл. / Едельвейс, 2014 – С. 246–247.

22. Хорошко, Л. С. Формирование двумерных структур на пористом анодном оксиде алюминия для применения в оптоэлектронике и фотокаталитической очистке воды / Л. С. Хорошко [и др.] // Наноструктурные материалы – 2014: Беларусь – Россия – Украина (НАНО-2014) : тез. докл.

IV Междунар. науч. конф, Минск, 7–10 октября 2014 г. / редкол.: П. А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2014. – С. 368.

23. Хорошко, Л. С. Формирование и люминесценция алюмоиттриевых композитов, легированных тербием, в пористом анодном оксиде алюминия // Л.С. Хорошко [и др.] // Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии (ИСМАРТ–2014) : тез. докл. Четвертой Междунар. конф., 12–16 октября 2014 г., Минск. – Минск : Изд. центр БГУ, 2014. – С. 136–137.

24. Хорошко, Л. С. Микроструктурированные пленки пористого анодного оксида алюминия для оптоэлектроники и фотокатализа / Л. С. Хорошко // 22-я Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2015» : тез. докл. в авторской редакции, 22–24 апреля 2015 г., Москва, Зеленоград. – М. : МИЭТ, 2015. – С. 25.

### Патенты

25. Преобразователь ионизирующего излучения : полез. модель RU 149869 U1 / В. С. Кортков, Л. С. Хорошко, Н. В. Гапоненко. – Оpubл. 20.01.2015.

## РЭЗЬЮМЭ

Харошка Людміла Сяргееўна

### СІНТЕЗ І ЛЮМІНЕСЦЭНТНЫЯ ЎЛАСЦІВАСЦІ НАНАСТРУКТУРАВАННЫХ АЛЮМАІТРЫЕВЫХ КАМПАЗІТАЎ, ЛЕГІРАВАННЫХ ТЭРБІЕМ

**Ключавыя словы:** люмінесцэнцыя, алюмаітрыевы кампазіт, тэрбій, нанопорысты анодны аксід алюмінію, золь-гель сінтэз.

**Мэта работы:** устанаўленне фізіка-хімічных заканамернасцей фарміравання алюмаітрыевых кампазітаў (гранатаў і пераўскітаў), легіраваных тэрбіем, з нітрат-цытратных золяў на падкладках з нанопорыстага аноднага аксиду алюмінію і ў выглядзе парашкоў, вывучэнне іх структуры і асаблівасцей люмінесцэнцыі іонаў тэрбію ў такіх матэрыялах для выкарыстання ў святловыпраменьваючых структурах і канвертарах розных выпраменьванняў ў бачны дыяпазон.

**Метады даследавання:** рэнтгенафазны аналіз, атамна-сілавая і скануючая электронная мікраскапія, люмінесцэнтная спектраскапія (у тым ліку з мікрасекундным часавым распазнаваннем).

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Зарэгістравана фота-, рэнтгена- і катодалюмінесцэнцыя тэрбію пры пакаёвай тэмпературы ў нанакрысталічных алюмаітрыевых кампазітах, атрыманых на порыстым анодным аксідзе алюмінію з нітрат-цытратных золяў. Устаноўлена наяўнасць двух цэнтраў люмінесцэнцыі тэрбію ў структурах алюмаітрыевы кампазіт / нанопорысты анодны аксід алюмінію, якія адпавядаюць знаходжанню іонаў тэрбію ў алюмаітрыевым пераўскіце і ў матэрыяле порыстай падкладкі. Устаноўлена пераразмеркаванне інтэнсіўнасці фоталюмінесцэнцыі ад матрыцы порыстага аноднага аксиду алюмінію (сіні дыяпазон) да тэрбію (зялёны дыяпазон) і наадварот адпаведна змене даўжыні хвалі ўзбуджэння, а таксама захаванне бачнай уласнай фоталюмінесцэнцыі аноднага аксиду алюмінію.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні.** Атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны пры стварэнні плёнкавых і парашковых канвертараў і дэтэктараў іанізуючага выпраменьвання, люмінесцэнтных выяў на падкладках з зададзенай канфігурацыяй паверхні.

**Галіна ужывання:** люмінесцэнтны аналіз, дэтэктары іанізуючых выпраменьванняў, нанатэхналогіі, мікра- і оптаэлектроніка.

## РЕЗЮМЕ

Хорошко Людмила Сергеевна

### СИНТЕЗ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ АЛЮМОИТТРИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ТЕРБИЕМ

**Ключевые слова:** люминесценция, алюмоиттриевый композит, тербий, нанопористый анодный оксид алюминия, золь-гель синтез

**Цель работы:** установление физико-химических закономерностей формирования алюмоиттриевых композитов (гранатов и перовскитов), легированных тербием, из нитрат-цитратных золь на подложках из нанопористого анодного оксида алюминия и в виде порошков, изучение их структуры и особенностей люминесценции ионов тербия в таких материалах для применения в светоизлучающих структурах и конвертерах различных излучений в видимый диапазон.

**Методы исследования:** рентгенофазовый анализ, атомно-силовая и сканирующая электронная микроскопия, люминесцентная спектроскопия (в т.ч. с микросекундным временным разрешением).

**Полученные результаты и их новизна.** Зарегистрирована фото-, рентгено- и катодолюминесценция тербия при комнатной температуре в нанокристаллических алюмоиттриевых композитах, полученных на пористом анодном оксиде алюминия из нитрат-цитратных растворов. Установлено наличие двух центров люминесценции тербия в структурах алюмоиттриевый композит / нанопористый анодный оксид алюминия, соответствующих положению ионов тербия в алюмоиттриевом перовските и в материале пористой подложки. Установлено перераспределение интенсивности фотолюминесценции от матрицы пористого анодного оксида алюминия (синий диапазон) к тербию (зеленый диапазон) и обратно с изменением длины волны возбуждения, а также сохранение визуализируемой собственной фотолюминесценции анодного оксида алюминия.

**Рекомендации по использованию.** Полученные результаты могут быть использованы при создании пленочных и порошковых конвертеров и детекторов ионизирующего излучения, люминесцентных изображений на подложках с заданной конфигурацией поверхности.

**Область применения:** люминесцентный анализ, детекторы ионизирующих излучений, нанотехнологии, микро- и оптоэлектроника.

## SUMMARY

Khoroshko Liudmila Sergeevna

### SYNTHESIS AND LUMINESCENT PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED TERBIUM-DOPED YTTRIUM ALUMINUM COMPOSITES

**Key words:** luminescence, aluminum-yttrium composite, terbium, nanoporous anodic aluminum oxide, sol-gel synthesis

**Aim of the work:** The establishment of the physicochemical regularities of the aluminum-yttrium composites (garnets and perovskites) doped with terbium formation from nitrate-citrate sols on nanoporous anodic alumina substrates and in the powder form, the study of their structure and luminescence properties of terbium ions in such materials for using in light-emitting structures and converters of various radiations into the visible range.

**Research methods:** X-ray phase analysis, atomic force and scanning electron microscopy, luminescent spectroscopy (including microseconds time-resolved).

**Obtained results and their novelty.** Photo-, X-ray and cathodoluminescence of terbium were recorded at room temperature in nanocrystalline aluminum-yttrium composites obtained on porous anodic alumina from nitrate-citrate sols. The presence of two terbium luminescence centers in the aluminum-yttrium composite/nanoporous anodic alumina structures corresponding to the position of terbium ions in the alumina perovskite and in the porous substrate material is established. The redistribution of the photoluminescence intensity from the porous anodic aluminum oxide matrix (blue band) to the terbium (green band) and back with a change in the excitation wavelength was registered, as well as the retention of the anodic alumina photoluminescence.

**Recommendations for use.** The obtained results can be used for creation film and powder converters and ionizing radiation detectors, luminescent images on substrates with a given surface configuration.

**Application area:** luminescent analysis, ionizing radiation detectors, nanotechnologies, micro- and optoelectronics.

*Научное издание*

**Хорошко Людмила Сергеевна**

**СИНТЕЗ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ АЛЮМОИТТРИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ,  
ЛЕГИРОВАННЫХ ТЕРБИЕМ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Специальность 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы

---

Подписано в печать  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд.л.

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Печать ризографическая.  
Тираж 60 экз.

Бумага офсетная  
Усл. печ. л.  
Заказ

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.  
2200013, Минск, П. Бровки, 6