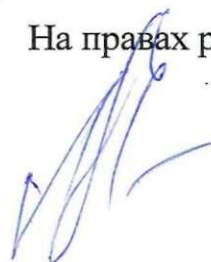


На правах рукописи



Цема Александр Алексеевич

**СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И КИНЕТИЧЕСКИЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАДИЕНТНО-АКТИВИРОВАННЫХ КРИСТАЛ-  
ЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ С ОПТИЧЕСКИМИ ЦЕНТРАМИ  $Yb^{3+}$ ,  $Er^{3+}$**

01.04.05 – оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Краснодар - 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» на кафедре оптоэлектроники физико-технического факультета.

Научный руководитель: **Строганова Елена Валерьевна**  
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Шандаров Станислав Михайлович**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
профессор кафедры электронных приборов

**Вербенко Илья Александрович**  
доктор физико-математических наук,  
директор НИИ физики ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский технологический университет» (МИРЭА)

Защита состоится 18.10.2019 г на заседании совета по защите диссертаций в Кубанском государственном университете по адресу: 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, д.149, к.231

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Кубанского государственного университета, на сайте [www.kubsu.ru](http://www.kubsu.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.101.07  
докт. физ.-мат. наук

М.В. Зарецкая

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современные оптические системы связи представляют собой технически и технологически сложные комплексы, основу которых составляют пассивные и активные компоненты, взаимодействующие между собой исходя из конечных задач и параметров оптической системы. Элементы оптических систем разделяются по скорости обмена данными, частотному рабочему диапазону и пропускной способности. Современные волоконные оптические линии связи (ВОЛС) работают в спектральном диапазоне от 1,46 до 1,675 мкм. Данный спектральный диапазон коррелирует с окном прозрачности атмосферы (1,5–1,8 мкм) и характеризуется минимальными потерями для распространения 1,5 мкм сигнала в световоде. Скорость обмена информационными потоками в перспективных ВОЛС в среднем достигает значений ~100 Гбит/с со средней пропускной способностью до 100 Тбит/с [1]. Это происходит за счет использования технологий спектрального и временного мультиплексирования. Для реализации указанных технологий определяющим критерием выступает ширина спектральной линии источника оптического излучения. Как правило, ВОЛС используют волоконно-оптические усилители с шириной спектральной линии порядка 40–80 нм. Дальнейшее увеличение параметров передачи и обработки оптических сигналов ВОЛС имеет ряд серьезных затруднений, одно из которых связано с границей окна прозрачности стеклянных световодов в области 2–2,2 мкм, а другое – с поиском широкополосных источников оптического излучения в области прозрачности оптического световода (1,4–2 мкм) [2–7].

Интерес к спектральному диапазону 2–5 мкм связан с тем, что коэффициент прозрачности атмосферы в этой области достигает своего максимального значения, равного более чем 90 %. В диапазоне 2–5 мкм в приземных слоях атмосферы обеспечивается наибольшая дальность наблюдения объектов, излучающих в диапазоне температур от –50 до +500 °С [8], к тому же в данном диапазоне наименьшие помехи вносят атмосферные метеоявления – туман, дождь и снег. На сегодняшний день широкое применение приобрели атмосферные оптические линии связи, относящиеся к высокоскоростным беспроводным системам, в частности основанным на технологии передачи данных в инфракрасном диапазоне. Такие ограничения связаны с использованием в промышленных телекоммуникационных системах в качестве источников излучения полупроводниковых лазеров, для которых максимальная мощность оптического излучения в спектральном диапазоне 2–5 мкм достигает величин порядка 550 мВт, для спектрального диапазона 1,9–2,2 мкм величина максимальной выходной мощности составляет порядка 800 мВт [9]. Современные разработки по увеличению выходной мощности лазерных систем в области среднего ИК спектрального диапазона связаны с разработкой гибридных лазерных систем на основе сочетаний волоконных и твердотельных халькогенидных матриц с оптическими центрами  $\text{Cr}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  [10–11, 13].

Таким образом, для перспективных направлений развития систем связи актуальной задачей является разработка источника оптического излучения, обладающего следующими основными характеристиками:

- ширина спектра усиления сигнала не менее 50 нм;
- мощность оптического излучения не менее 500 мВт;
- возможность перестройки сигнала оптического излучения в различных спектральных диапазонах либо наличие многоканальной излучательной релаксации.

Наибольший интерес в области инфокоммуникационных технологий представляют нелинейные кристаллы, на основе которых создаются фотонные структуры (регулярные доменные структуры), позволяющие увеличивать количество выходных оптических сигналов, а также расширять спектральный диапазон за счет нелинейных эффектов преобразования суммарных и разностных частот. Использование нелинейных кристаллов дает возможность создавать на одной подложке сложные и многофункциональные интегрально-оптические схемы [12].

Выбор объекта исследований в данной работе был сделан в пользу нелинейного кристалла ниобата лития. Это обусловлено тем, что он относится к сегнетоэлектрикам, в которых сочетаются электрооптические и нелинейно-оптические свойства, что делает его перспективным материалом для создания множества фотонных приборов. Электрооптический эффект ниобата лития с умеренно высоким коэффициентом позволяет использовать его в производстве высокоскоростных цифровых модуляторов для инфокоммуникационных систем. Неактивированный материал этого кристалла имеет область прозрачности от 310 нм до 5500 нм (более 3,65 эВ), что является весьма важным для разработки и создания на его основе компонентной базы фотоники с целью проектирования оптических линий связи с новыми перспективными параметрами и характеристиками [14].

В качестве оптических центров при легировании кристаллов ниобата лития были выбраны ионы редкоземельных элементов  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$ , которые традиционно используются как ионы-активаторы кристаллических материалов с целью получения излучения в области 1,5 и 3 мкм. В научной отрасли разработки эффективных оптических усилителей и лазеров на основе кристаллических материалов существует проблема, связанная с эффективностью продольной оптической накачки лазерного элемента. Она заключается в том, что при традиционном способе однородного легирования (длина активного компонента достигает нескольких сантиметров) 90 % мощности оптического излучения накачки поглощается на расстоянии 3–5 мм от его входной грани. Такие процессы приводят к возникновению локального перегрева активированного лазерного элемента, неравномерному распределению теплового поля и, как следствие, ухудшению качества лазерного излучения и резкому снижению эффективности оптической накачки.

Для возможного решения проблемы, касающейся повышения эффективности оптической накачки, в данной работе в качестве перспективной активной лазерной среды рассматривается кристалл ниобата лития, легированный редкоземельными ионами  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$ , а также примесными ионами  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  [15–17], распределение которых описывается некоторыми заданными функциями зависимостей концентраций оптических центров от продольной координаты кристаллической були [18–21] (концентрационные профили).

**Целью** данной работы являются спектрально-люминесцентные и кинетические исследования полученных оптических градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  с концентрационными профилями оптических центров  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$  и примесными центрами  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и установление закономерностей влияния концентрационных профилей примесных центров на спектрально-люминесцентные и кинетические свойства исследуемых монокристаллов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1 Физико-математическое моделирование различных функций распределения концентраций примесных центров (Li, Nb, Mg(Zn)) в составе расплавов тиглей и кристалле относительно продольной координаты кристалла ниобата лития.

2 Синтез лабораторных образцов оптических градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  с реализацией концентрационных профилей оптических центров  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$  и примесных центров ионов релаксаторов  $\text{Ce}^{3+}$ , а также ионов нефоторефрактивной примеси  $\text{Zn}^{2+}$ , распределенных относительно продольной координаты монокристалла.

3 Установление закономерностей влияния концентрационных профилей примесных центров на спектрально-люминесцентные и кинетические свойства градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ ,  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce,Zn})$ .

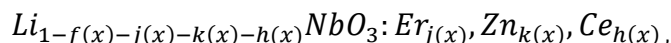
4 Определение особенностей процессов безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения в градиентно-активированном кристалле  $\text{LiNbO}_3$  с оптическими центрами ионов эрбия, иттербия.

5 Разработка макета оптического усилителя и лазера с активным элементом, выполненным на основе оптического градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ .

6 Разработка программ для расчета спектрально-кинетических и генерационных характеристик оптических градиентно-активированных кристаллов с концентрационными профилями оптических центров.

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

1 Получены градиентно-активированные монокристаллы с заданными контролируемые распределениями оптических примесей (концентрационные профили) вдоль оси роста кристалла с концентрационными профилями нефоторефрактивной примеси и ионов-релаксаторов с общей химической формулой:



где  $j(x)$  – функция зависимости концентрации ионов эрбия от продольной координаты в кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  (предельные концентрации изменяются от 0,02 до 0,3 ат.%); в кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  (предельные концентрации изменяются от 4,1 до 2,5 ат.%);

$k(x)$  – функция распределения концентрации ионов цинка в кристаллах  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce,Zn})$  (концентрация вдоль продольной координаты кристалла не изменяется, остается постоянной и равной 5 ат.%);

$h(x)$  – функция распределения концентрации ионов церия в кристаллах  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce,Zn})$  (предельные концентрации изменяются от 0 до 0,3 ат.% и от 0,3 до 0,41 ат.%);

$x$  – продольная координата кристалла.

2 Установлена закономерность влияния концентрационного профиля оптических центров ионов  $\text{Er}^{3+}$  на люминесцентные свойства градиентно-активированных кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  (предельные концентрации  $\text{Er}^{3+}$  изменяются от 4,1 до 2,5 ат.%), а также кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce,Zn})$ . Показано, что изменения интегральных интенсивностей поглощения, излучения в различных спектральных диапазонах с точностью более 85 % коррелируют с изменением концентрационного профиля оптического центра.

3 Выявлены зависимости влияния концентрационных профилей оптических ионов  $\text{Er}^{3+}$  на кинетические свойства градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ , а также ионов релаксаторов  $\text{Ce}^{3+}$  на кинетические свойства ионов  $\text{Er}^{3+}$  в градиентно-активированных кристаллах  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce,Zn})$ .

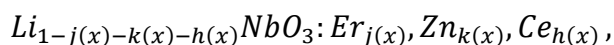
4 Определены коэффициенты усиления исследуемых градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$  в области 1,5 мкм, изменяющиеся в диапазоне от 10 до 18 дБ при изменении уровня опорного сигнала от 0,12 до 0,41 мВт.

5 Разработан макет лазерного активного элемента на основе градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$ . Проведен сравнительный анализ параметров начала развития генерационных процессов в лазерных элементах для градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  (концентрация ионов идентична концентрации Er) и случая однородно легированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  (концентрация оптических центров равна средней концентрации профилей). Получено, что эффективность продольной накачки градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$  на 20 % выше, чем для однородно легированного кристалла с таким же набором примесных ионов.

#### Научная новизна заключается в следующем:

- впервые проведено физико-математическое моделирование процесса подпитки расплава с целью получения градиентно-активированных кристаллов ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$  с одним или одновременно двумя концентрационными профилями примесных центров  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Nb}^{5+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  ( $\text{Zn}^{2+}$ );

- впервые получены лабораторные образцы градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с нефоторефрактивной примесью Zn с целью улучшения лучевой стойкости кристалла:



где  $j(x)$  – функция зависимости концентрации оптических центров ионов  $\text{Er}^{3+}$  от продольной координаты кристалла;

$k(x)$  – функция зависимости концентрации оптических центров ионов  $\text{Zn}^{2+}$  от продольной координаты кристалла;

$h(x)$  – функция зависимости концентрации оптических центров ионов  $\text{Ce}^{3+}$  от продольной координаты кристалла;

- проведены спектрально-кинетические исследования градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$  и установлены закономерности влияния концентрационных профилей Ce и Zn, связанные со снижением характерного люминесцентного время жизни  $\text{Er}^{3+}$ ;

- проведены расчеты сечений излучения и коэффициента усиления в исследуемых образцах градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ ,  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$  в области 1,5 мкм. Установлено, что при одинаковых концентрациях ионов  $\text{Er}^{3+}$  кристаллы  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$  демонстрируют увеличение сечения излучения не ниже уровня 50 % и рост коэффициента усиления не ниже 15 % по сравнению с кристаллами  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ . При этом в градиентно-активированном кристалле  $\text{LiNbO}_3$  с концентрационным профилем ионов  $\text{Er}^{3+}$  не менее, чем на 50 % увеличивается коэффициент усиления по сравнению с кристаллом  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce}, \text{Zn})$ ;

- проведен сравнительный анализ генерационных параметров однородно легированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$ ,  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  и градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$  (изменение концентрации  $\text{Yb}^{3+}$  от 1,2 до 0,6 ат.%; изменение концентрации

$\text{Er}^{3+}$  от 0,02 до 0,3 ат.%),  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  (изменение концентрации  $\text{Er}^{3+}$  от 4,1 до 2,5 ат.%), который показал, что градиентно-активированный кристалл  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$  обладает минимальной пороговой мощностью накачки  $0,49 \text{ кВт/см}^2$ ;

- разработан макет активного лазерного элемента на основе градиентно-активированного кристалла с реализацией одновременных концентрационных профилей оптических центров ионов  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$ . При уровне опорного сигнала от 0,12 мВт до 0,41 мВт получен диапазон изменения значения усиления оптического сигнала от 10 до 18 дБ на длине волны 1546 нм.

### **Практическое значение работы и апробация:**

Разработанные макеты оптического усилителя и лазера на базе градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$  могут служить основой для разработки экспериментальных устройств. а методики спектрально-кинетических и люминесцентных исследований градиентно-активированных кристаллов позволили расширить базу инструментария анализа оптических материалов.

Научно-исследовательские работы, представленные в настоящей диссертации, проведены на кафедре оптоэлектроники ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» в рамках фундаментальных НИР: 1) ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009–2013): а) «Градиентно-сенсibilизированные лазерные среды» по Государственному контракту на выполнение научно-исследовательских работ от 20 ноября 2009 г. № П2519 (2009–2011); б) «Разработка и исследование устройств для оптофлюидики на основе фотонных кристалловолокон» по Соглашению № 14.В37.21.1919 (2012–2013); 2) РФФИ\_р\_юг\_ц № 11-02-96501 «Разработка 1,5-мкм усилителя на гетеродесмических градиентных кристаллах»; 3) государственное задание Минобрнауки РФ № 8.4958.2017/БЧ «Методы повышения обнаружительной способности детектора терагерцового излучения на базе градиентного PPLN».

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях: Научно-техническая конференция-семинар по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ (Москва, 2011); Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ (Москва, 2012); III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ (Москва, 2014); XXII Международная конференция «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 2016); XXIX Международная конференция «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 2018).

**Личный вклад соискателя.** Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично либо при его непосредственном участии.

**Опубликованность результатов диссертации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 10 научных работах, в числе которых 3 статьи в научных журналах из перечня ВАК, 1 статья в журнале БД Scopus, 1 патент на изобретение и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, 1 отчет по НИР, 3 статьи в материалах международных и всероссийских конференциях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы из 131 наименования, в том числе собственные публикации автора, насчитывает 147 страницы текста, 95 рисунка и 18 таблиц.

## КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА ДИССЕРТАЦИИ

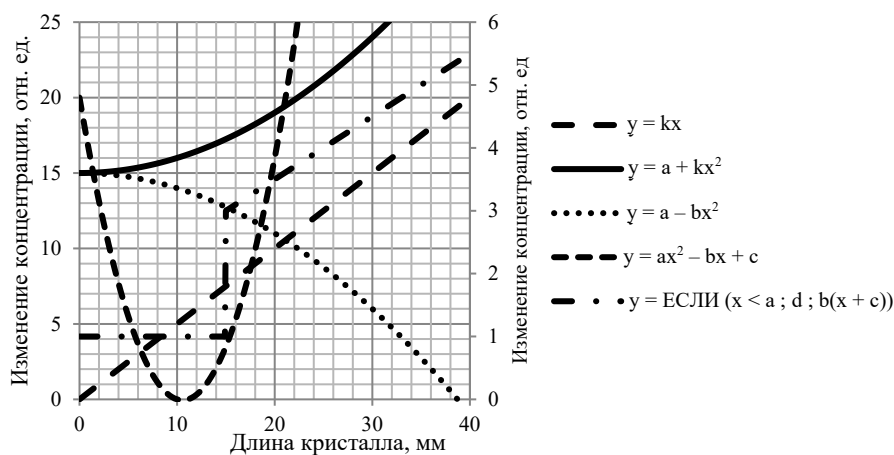
**Введение** практически полностью повторяет предыдущие разделы автореферата. В нем обосновывается актуальность и значимость темы диссертационной работы, раскрывается мотивация как самого исследования, так и выбора спектрального диапазона и метода исследований. Определяется теоретическая и практическая значимость результатов, полученных в работе. Перечисляются цели и задачи исследования, новизна полученных результатов и положения, выносимые на защиту. Характеризуется апробация результатов.

**В первой главе** рассмотрены спектрально-люминесцентные и оптические характеристики эффективных твердотельных матриц для генерации в области 1,5 мкм. В **разделе 1.2** исследуются спектрально-люминесцентные свойства световодов, легированных ионами Yb, Er. Отмечены ограничения использования волоконных лазеров на основе световодов, легированных ионами Er<sup>3+</sup>, для разработки высокоомощных лазерных систем [1–6]. В **разделе 1.3** описаны спектрально-люминесцентные свойства ниобата лития, легированного ионами Yb<sup>3+</sup> и Er<sup>3+</sup>. Кристаллы ниобата лития LiNbO<sub>3</sub> являются одними из наиболее востребованных нелинейных материалов на сегодняшний день, что объясняется наличием широкого спектра оптических свойств LiNbO<sub>3</sub>, возможностью получения лазерной генерации с самоудвоением частоты в полосе прозрачности кристаллической матрицы (до 5 мкм). Эти особенности позволяют моделировать на LiNbO<sub>3</sub> различные фотонные устройства [7–9]. Однако сложные процессы безызлучательного взаимодействия между оптическими ионами требуют проведения исследований по изучению влияния прямого и обратного переноса энергии с целью определения оптимально эффективных концентраций ионов Yb<sup>3+</sup> и/или Er<sup>3+</sup> в кристаллах ниобата лития [10–20].

**Во второй главе** описаны объекты и методы исследований. В **разделе 2.1** рассмотрен способ получения кристаллических оптических материалов – градиентно-активированных кристаллов. Проведено моделирование процесса выращивания градиентно-активированных кристаллов на основе ниобата лития с некоторыми вариантами функций подпитки расплава с целью получения концентрационных профилей (функция зависимости продольного распределения концентрации примесных центров от продольной координаты кристаллической були) различного функционального вида от продольной координаты (рис.1) [7, 10].

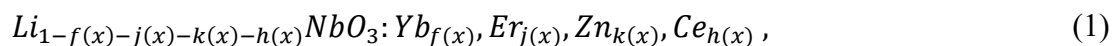
В рамках рассмотренной технологии получения градиентно-активированных кристаллов и процессов моделирования подпитки расплава, изменяющейся по различным функциональным зависимостям, были выращены лабораторные образцы монокристаллов ниобата лития с различными концентрационными примесями оптических центров. Для практической реализации концентрационных профилей выбраны варианты с плавно изменяющейся концентрацией примесных и/или оптических центров [4, 7, 10].





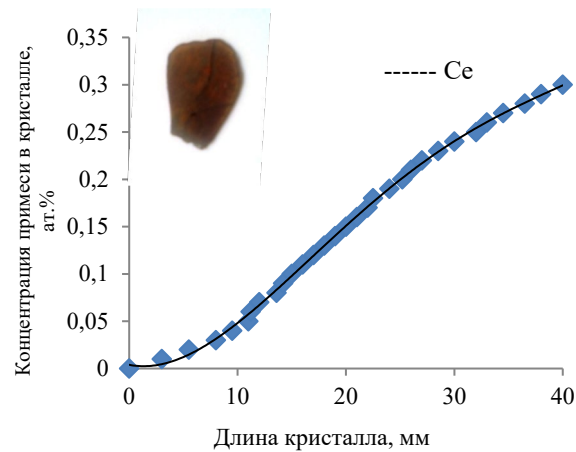
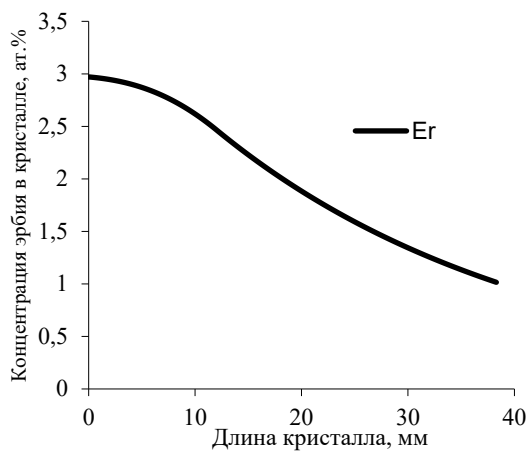
**Рисунок 1** – Различные виды функции распределения концентраций примесных центров в градиентно-активированных кристаллах ниобата лития [7, 10]

В разделе 2.2 описано получение лабораторных образцов градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  с концентрационными профилями примесных центров. На основании проведенного моделирования получены лабораторные образцы градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с общей химической формулой:



где  $j(x)$  – концентрационный профиль оптических центров ионов  $\text{Er}^{3+}$  (от 0,02 ат.% до 0,3 ат.%; от 4,1 ат.% до 2,1 ат.% и от 2,7 ат.% до 1,8 ат.%);  
 $k(x)$  – концентрационный профиль нефоторефрактивной примеси ионов  $\text{Zn}^{2+}$  (от 2 ат.% до 1,6 ат.%);  
 $h(x)$  – концентрационный профиль примеси ионов  $\text{Ce}^{+3}$  (от 0 ат.% до 0,3 ат.% и от 0,3 ат.% до 0,4 ат.%).

В рамках диссертационного исследования были получены монокристаллы ниобата лития с плавно изменяющимися концентрационными профилями, вид которых представлен на рисунках 2, 3.

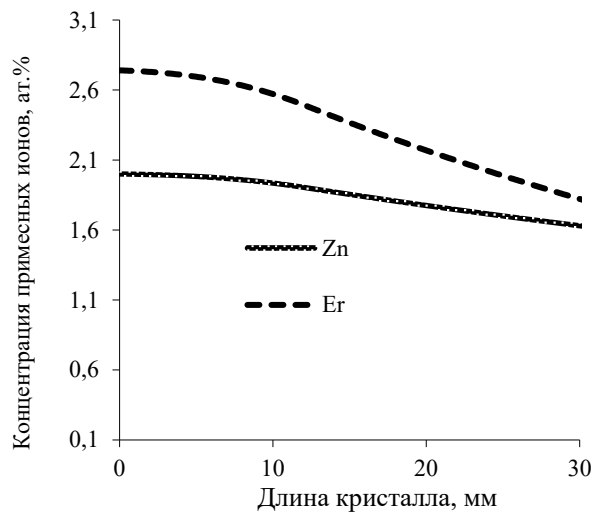
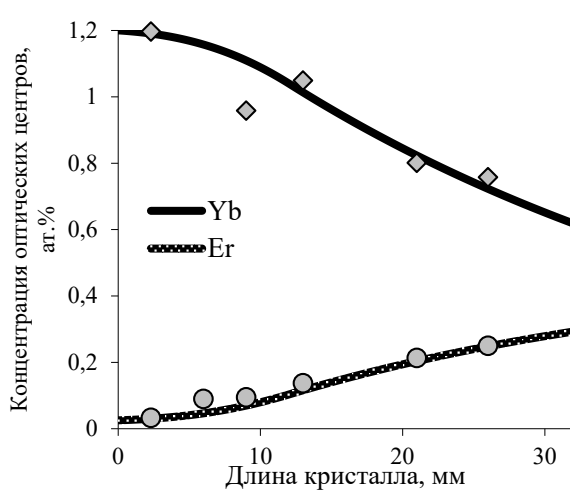


а)

б)

**Рисунок 2** – Зависимость распределения концентраций примесных центров в градиентно-активированных кристаллах ниобата лития состава  $R = 0,94$  от продольной координаты кристаллов: а)  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ ; б)  $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Ce}$  (концентрация эрбия постоянная и равна 0,15 ат.%)

После реализации в градиентно-активированных кристаллах ниобата лития концентрационных профилей одного примесного центра (Er, Ce) был реализован ростовой процесс получения градиентно-активированного кристалла с двойным концентрационным профилем (рис. 3).



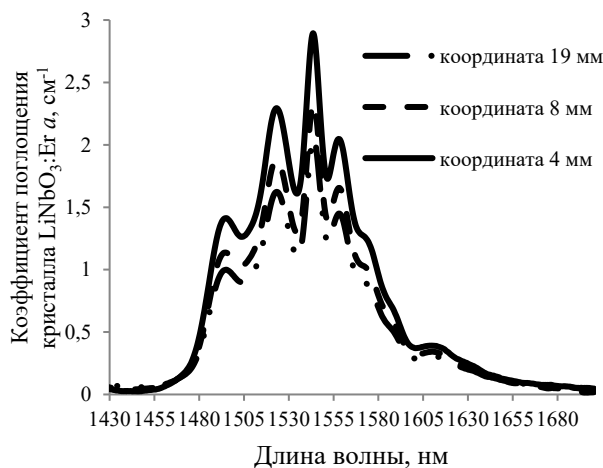
а)

б)

**Рисунок 3** – Зависимость распределения концентраций примесных центров в градиентно-активированных кристаллах ниобата лития состава  $R = 0,94$  от продольной координаты кристаллов: а)  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ ; б)  $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Zn}$

В разделе 2.3 рассмотрены методики получения экспериментальных данных и обработки полученных результатов.

**Глава третья** посвящена спектрально-люминесцентным и кинетическим исследованиям градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  с оптическими ионами  $\text{Yb}^{3+}$  и/или  $\text{Er}^{3+}$ , а также с примесными центрами  $\text{Ce}^{3+}$  и/или  $\text{Zn}^{2+}$  в спектральных диапазонах 1400 – 1700 нм и 2500 – 3000 нм. В **разделе 3.1** проанализированы спектры поглощения и люминесценции градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$  и определено влияние концентрационных примесей на спектрально-люминесцентные свойства

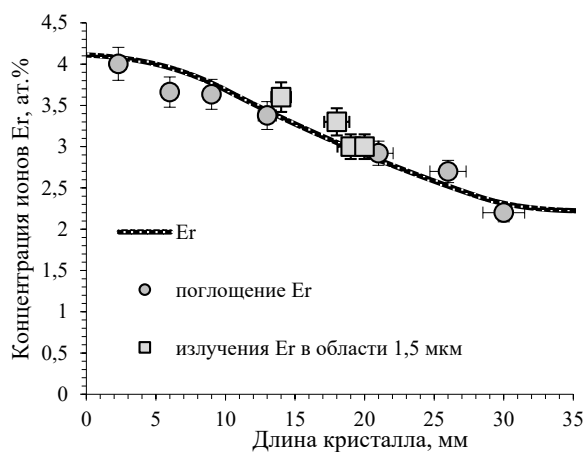


**Рисунок 4** – Спектры поглощения градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ , измеренные в произвольных продольных координатах образца относительно концентрационного профиля Er

исследуемых градиентно-активированных кристаллов.

На рисунке 4 представлен пример спектров поглощения, измеренных в произвольных координатах кристаллической пластинки градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ . Исследования поглощения градиентно-активированных кристаллов показали, что интегральные интенсивности поглощенной энергии  $E$ ,  $\text{см}^{-1}$  полностью коррелируют с концентрационными профилями оптических центров и имеют одинаковый вид функций распределения относительно продольной координаты кристалла. На рисунке 5 представлена корреляция концентрационного профиля примесного центра Er в  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  в градиентно-активированном

кристалле с интегральными интенсивностями спектров поглощения и излучения, измеренными в спектральном диапазоне от 1400 до 1700 нм.



**Рисунок 5** – Корреляция интегральных интенсивностей поглощения и излучения в спектральном диапазоне 1400–1700 нм относительно концентрационного профиля ионов  $\text{Er}^{3+}$  в градиентно-активированном кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$

Исследования градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$  показали, что процесс корреляции между интенсивностью излучения и концентрационным профилем Er в спектральном диапазоне 1400–1700 нм нарушается на величину, превышающую допустимое значение (на маркерах отмечен уровень допустимой погрешности (рис. 6)).

На рисунке 6 приведена зависимость интегральных интенсивностей излучения ионов Er в области 1,5 мкм относительно концентрационных профилей оптических центров ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ . Обнаружено, что интегральная интенсивность излучения в диапазоне 1,47–1,7 мкм коррелирует с концентрационным профилем

доноров Yb в диапазоне изменения концентрации эрбия 0,125–0,24 ат.%. Это может

быть объяснено развитием процессов многоканальной релаксации, в том числе и обратного переноса энергии электронного возбуждения от ионов  $\text{Er}^{3+}$  к ионам  $\text{Yb}^{3+}$ .

### В разделе 3.2

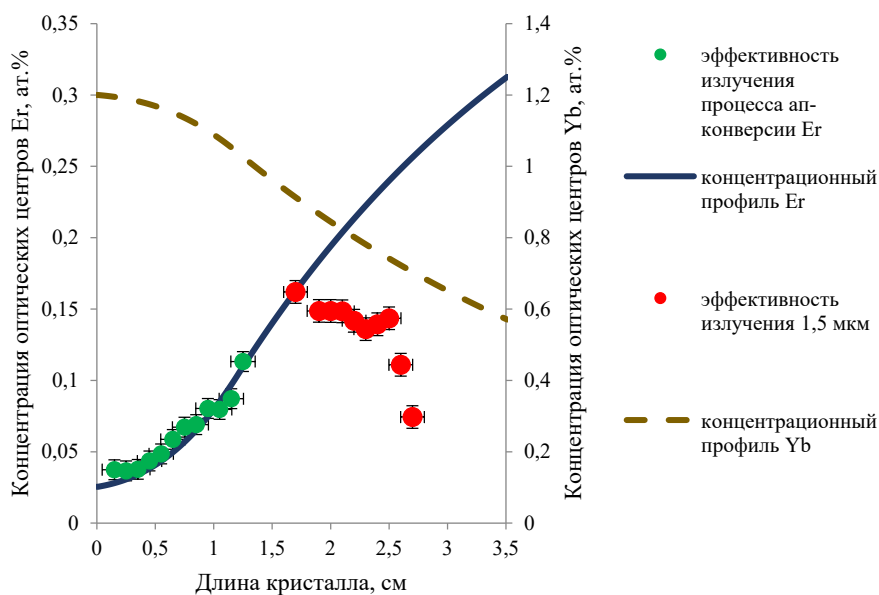
представлены результаты спектрально-люминесцентных исследований градиентно-активированных кристаллов

$\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$  в различных спектральных диапазонах. Интерес исследований

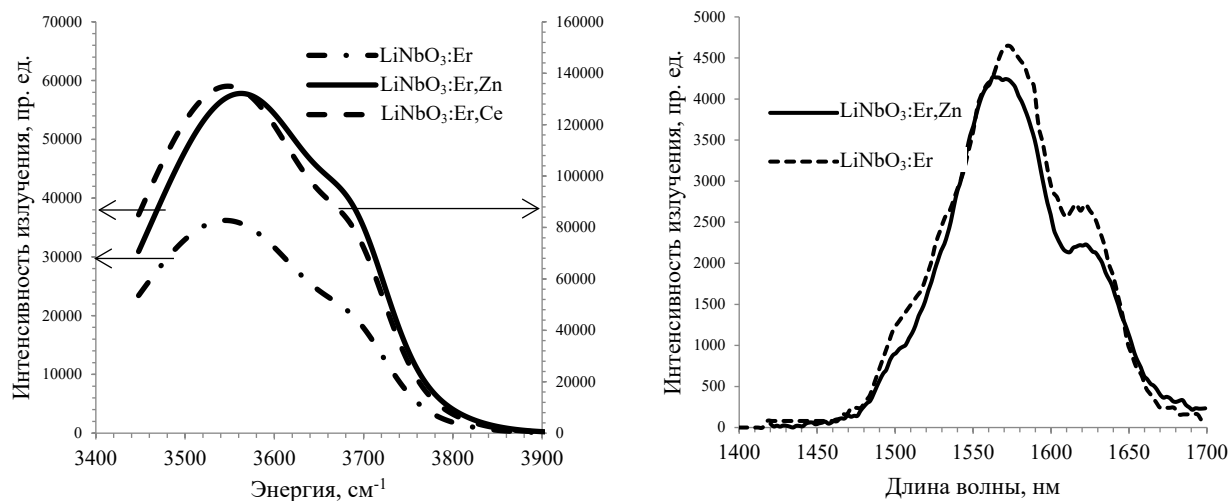
$\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$  обусловлен возможностью получения лазерной генерации на ионах  $\text{Er}^{3+}$  и самоудвоением ее частоты благодаря нели-

нейно-оптическим свойствам матрицы  $\text{LiNbO}_3$ . Кроме того, как уже отмечалось [17–19], ионы редкоземельных элементов, наряду с ионами нефоторефрактивных примесей, оказывают влияние на фоторефракцию матрицы  $\text{LiNbO}_3$ .

На рисунке 7 представлены типичные спектры градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$  в произвольных координатах кристалла в спектральных областях 2,9 мкм и 1,5 мкм.



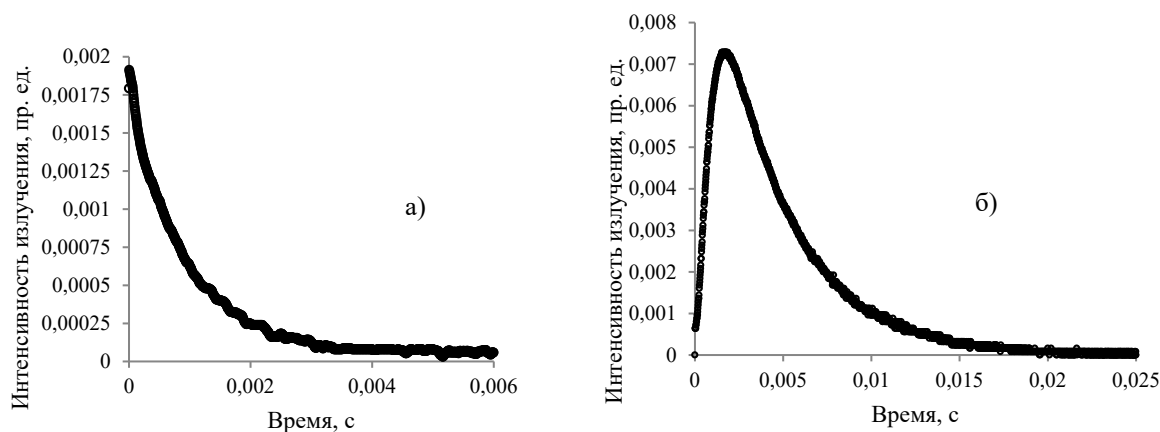
**Рисунок 6** – Зависимость интегральной интенсивности излучения оптических центров Er в различных спектральных диапазонах от концентрационных профилей акцепторов (Er) и доноров (Yb) [8]



**Рисунок 7** – Типичные спектры излучения градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ ;  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$ , измеренные в произвольных координатах: а) в области 2,9 мкм и б) в области 1,5 мкм [9]

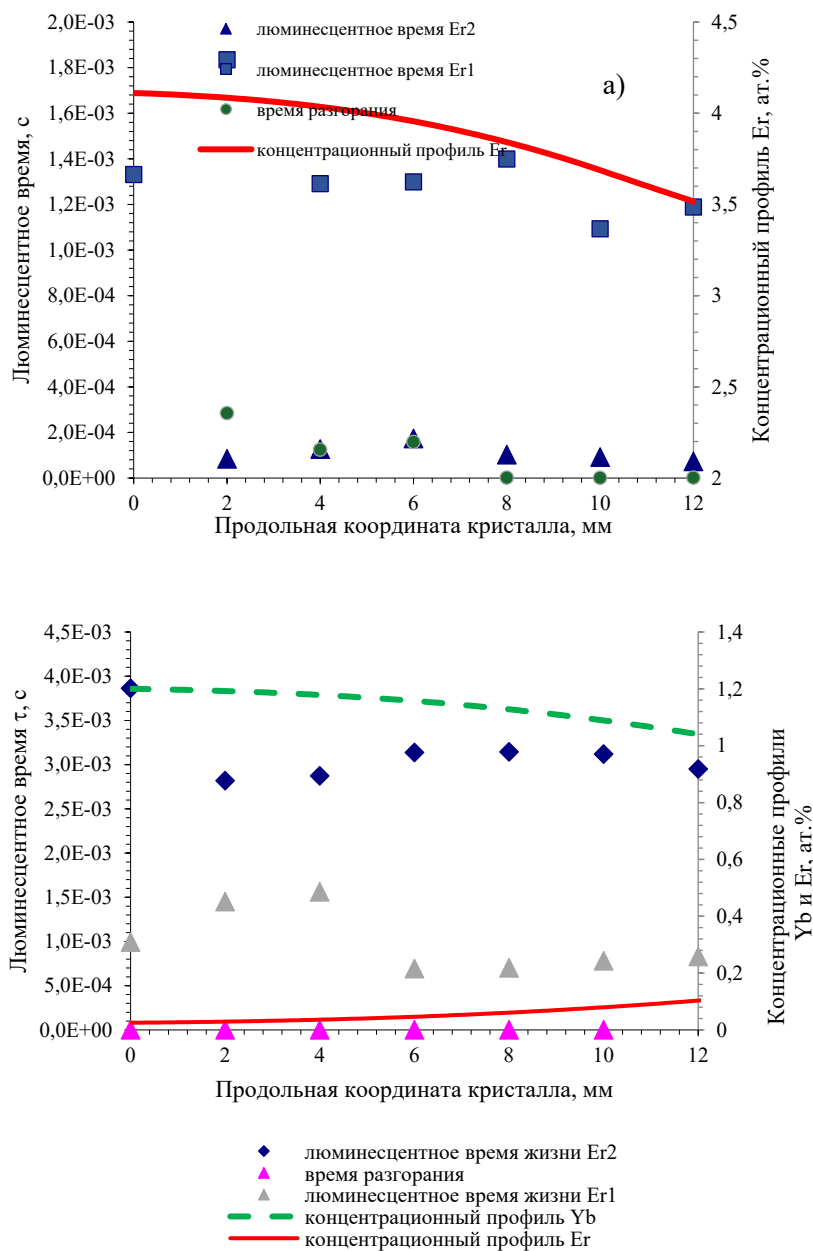
В разделе 3.3 представлены кинетические исследования полученных градиентно-активированных кристаллов с одним и/или двумя оптическими центрами:  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ ;  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$ ;  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$ .

На рисунке 8 (а, б) представлены типичные кинетики затухания люминесценции градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ ;  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$ , измеренные на длине волны 980 нм после возбуждения импульсом YAG:Nd лазера с длиной волны генерации 1053 нм.



**Рисунок 8** – Кинетики затухания люминесценции кристаллов: а)  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  и б)  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$  после возбуждения импульсом YAG:Nd лазера [2]

Наличие концентрационных профилей оптических центров в исследуемых образцах, а также принципиальная возможность иона эрбия занимать две неэквивалентных кристаллографических позиции в кристаллах ниобата лития [18], может являться основанием для



**Рисунок 9** – Зависимость люминесцентных времен жизни оптических центров и времени разгорания возбужденного состояния от координаты исследуемого градиентно-активированного кристаллов: а)  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ ; б)  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  [4, 5]

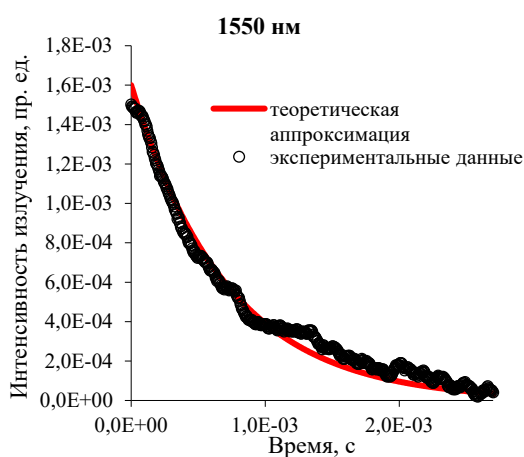
гипотезы об изменении люминесцентного времени жизни оптических центров в зависимости от изменения концентрации ионов относительно продольной координаты кристаллической пластинки (концентрационного профиля).

Для подтверждения данной гипотезы были проведены исследования кинетик затухания люминесценции градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  относительно концентрационных профилей оптических центров (вдоль длины исследуемого образца (вдоль оси  $c$ )). Измерения кинетик затухания люминесценции градиентно-активированного кристалла проводились путем сканирования процесса дезактивации электронного возбуждения ионов Er (и/или Yb) вдоль длины отполированной пластинки кристалла. Результаты исследований (рис. 9 (а, б)) представлены в концепции двух неэквивалентных оптических

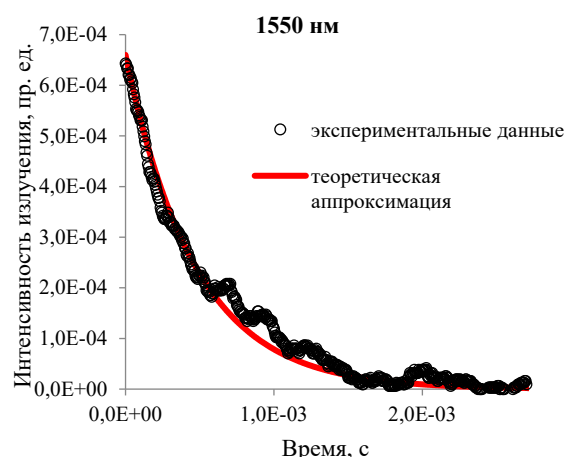
центров. На рисунках, помимо изменения люминесцентного времени относительно координаты исследуемого образца, представлено изменение времени разгорания в зависимости от координаты кристалла и концентрационного профиля. Из проведенных исследований можно сделать вывод, что в кристаллах с единственным профилем оптического центра  $\text{Er}^{3+}$  прослеживается корреляция люминесцентного времени жизни возбужденного со-

стояния, разгорания с концентрационным профилем. Это полностью соответствует спектрально-люминесцентным исследованиям данного градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ . Для градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  корреляция люминесцентного времени жизни оптических центров с концентрационным профилем не прослеживается. Это может быть объяснено сложными нелинейными процессами безызлучательного взаимодействия между оптическими центрами доноров  $\text{Yb}^{3+}$  и акцепторов  $\text{Er}^{3+}$ , а также процессами ап-конверсии в ионах  $\text{Er}^{3+}$ . Полученные результаты совпадают со спектрально-люминесцентными исследованиями излучения исследуемых образцов в области 1,5 мкм (рис. 6).

Интерес к кристаллам, активированным ионами  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Ce}^{3+}$ , связан с возможностью эффективного тушения уровня  $^4\text{I}_{11/2}$ , ответственного за излучение в области 2,9 мкм. Ион  $\text{Ce}^{3+}$  обладает высоким сечением перехода  $\sim 10^{-18} \text{ см}^2$  между двумя энергетическими уровнями – основным  $^2\text{F}_{5/2}$  и возбужденным  $^2\text{F}_{7/2}$ . Энергетический зазор  $^2\text{F}_{5/2} - ^2\text{F}_{7/2}$  составляет около  $2,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ , что достаточно близко к зазору  $^4\text{I}_{11/2} - ^4\text{I}_{13/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$ . Таким образом, создаются условия селективного поглощения излучения в области 3 мкм и шунтирования предлазерного энергетического уровня [20]. На рисунке 10 показана характерная кинетика затухания люминесценции кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Ce,Zn}$ , измеренная в области 1,5 мкм. Рисунок 11 демонстрирует результаты исследований люминесцентного времени жизни возбужденных состояний в градиентно-активированном кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Zn}$ .



**Рисунок 10** – Кинетики затухания люминесценции градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Ce,Zn}$ , измеренные после возбуждения импульсом лазера с длиной волны 980 нм [9]



**Рисунок 11** – Кинетики затухания люминесценции градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Zn}$ , измеренные после возбуждения импульсом лазера с длиной волны генерации 980 нм [9]

В таблице 1 представлены полученные люминесцентные времена жизни возбужденных состояний исследуемых кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Ce,Zn}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Zn}$ .

**Таблица 1** – Люминесцентное время жизни возбужденных состояний градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er(Ce,Zn)}$

Образец	Концентрации примесных центров, ат.%			$\tau_{\text{люм}}$ , мс			
	Er	Ce	Zn	1530 нм	1550 нм	1570 нм	1600 нм

LiNbO <sub>3</sub> :Er,Ce,Zn	0,015	0,2	5	0,55	0,71	0,7	-
LiNbO <sub>3</sub> :Er,Zn	2,6	-	1,7	0,51	0,47	0,6	0,6

Как видно из представленных результатов, кристаллы демонстрируют снижение люминесцентного времени жизни возбужденного состояния относительно реперного значения в кристалле LiNbO<sub>3</sub>:Er ( $\tau_{\text{люм}} = 1,05$  мс). Таким образом, взаимодействие оптических центров Er<sup>3+</sup> с ионами-сенсбилизаторами Ce<sup>3+</sup> и Zn<sup>2+</sup> определяет снижение эффективного люминесцентного времени жизни возбужденного состояния в области 1,5 мкм исследуемых образцов.

В **четвертой главе** были проведены исследования квантовой эффективности градиентно-активированных кристаллов LiNbO<sub>3</sub>:Yb,Er и LiNbO<sub>3</sub>:Er [1-2, 5, 7, 10]. В **разделе 4.1** проведены исследования процессов безызлучательного взаимодействия оптических центров градиентно-активированного кристалла LiNbO<sub>3</sub>:Yb,Er в рамках прыжкового механизма Ферстера–Декстера–Галанина. Рассчитаны микропараметры процесса переноса энергии электронного возбуждения и эффективность переноса энергии между донорами (Yb<sup>3+</sup>) и акцепторами (Er<sup>3+</sup>) при наличии концентрационных профилей оптических центров в градиентно-активированном кристалле без учета обратного процесса переноса энергии и процесса ап-конверсии (2–7) в рамках физико-математической модели.

$$W_p(N_{Yb} - n_{Yb}) - \frac{n_{Yb}}{\tau_{Yb}} - \left( \frac{\gamma_d}{2\sqrt{t}} + W_d \right) n_{Yb} = 0 \quad (2)$$

$$- \frac{n_{Er}}{\tau_{Er}} + \left( \frac{\gamma_d}{2\sqrt{t}} + W_d \right) n_{Yb} = 0 \quad (3)$$

$$W_{tr} = \left( \frac{\gamma_d}{2\sqrt{t}} + W_d \right) \quad (4)$$

$$\sigma_{absEr}(N_{Er} - n_{Er}) - \sigma_{loss}N_{Er} = \sigma_{emEr}n_{Er} \quad (5)$$

$$W_p(N_{Yb} - n_{Yb}) - W_{tr}n_{Yb} - \frac{n_{Yb}}{\tau_{Yb}} = 0 \quad (6)$$

$$W_{tr}n_{Yb} - \frac{n_{Er}}{\tau_{Er}} = 0 \quad (7)$$

где  $N_{Yb}$  и  $n_{Yb}$  ( $N_{Er}$  и  $n_{Er}$ ) – концентрация невозбужденных и возбужденных доноров Yb<sup>3+</sup> (акцепторов Er<sup>3+</sup>), соответственно, см<sup>-3</sup>;

$\sigma_{absEr}$  и  $\sigma_{emEr}$  – сечение поглощения и эмиссии акцепторов Er<sup>3+</sup> на длине волны генерации, соответственно, см<sup>2</sup>;

$\sigma_{loss} = T/(2N_{Er}L)$  – сечение выходных потерь, см<sup>2</sup>;

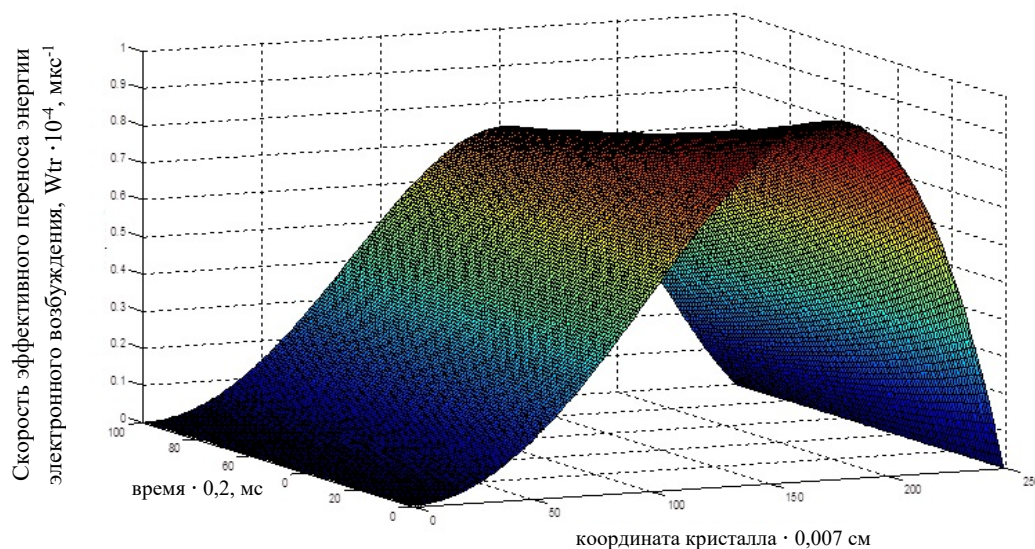
$W_p$  – скорость оптической накачки сенсбилизированной среды;

$W_{tr} = W_m + \gamma^2$  – эффективная скорость переноса энергии от доноров Yb<sup>3+</sup> к активным центрам Er<sup>3+</sup>, где  $W_m = \pi(2\pi/3)^{3/2}(C_{dd}C_{da})^{1/2}N_1N_2(1-\beta)$  – скорость миграционных процессов возбуждения по системе доноров.

В представлении одномерной модели распространения оптической энергии накачки (вдоль продольной координаты кристалла) выявлено, что скорость переноса энергии электронного возбуждения имеет функциональную зависимость от продольной координаты



градиентно-активированного кристалла и в области концентраций акцепторов Er от  $4 \cdot 10^{19}$  до  $5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> и доноров Yb от  $1,2 \cdot 10^{20}$  до  $0,9 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup> характеризуется эффектом насыщения, что определяет оптимальный диапазон концентраций доноров и акцепторов для полученного лабораторного образца градиентно-активированного кристалла LiNbO<sub>3</sub>:Yb,Er. На рисунке 12 представлена зависимость эффективности переноса энергии электронного возбуждения от концентрационных профилей оптических центров и координаты кристалла [1, 2].

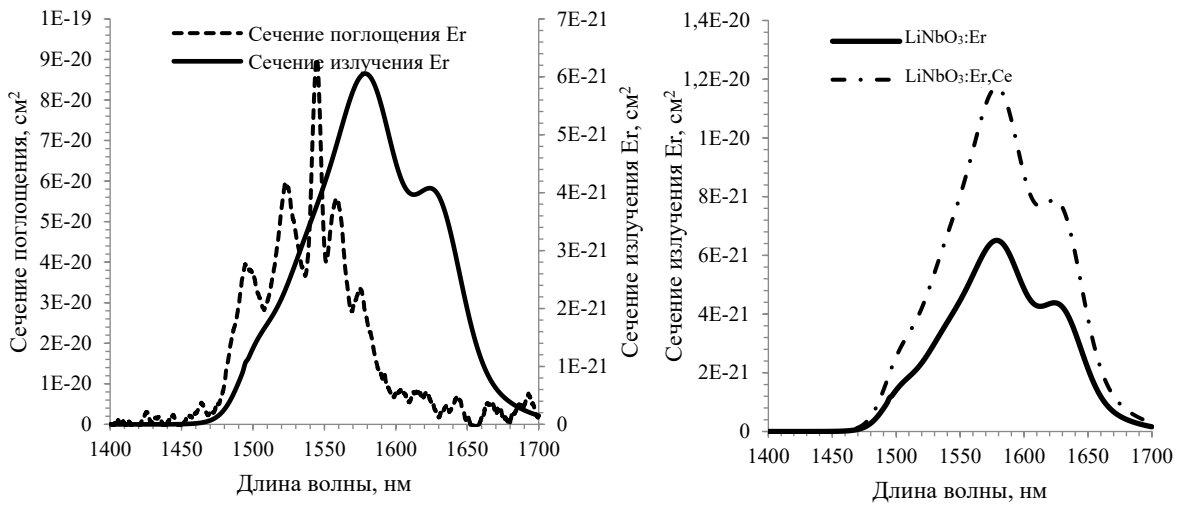


**Рисунок 12** – Зависимость скорости эффективного переноса энергии электронного возбуждения от координаты кристалла и времени релаксации возбуждения в градиентно-активированном кристалле LiNbO<sub>3</sub>:Yb,Er [1, 2, 10]

В разделе 4.2 проведены исследования спектров сечений поглощения, излучения и расчеты спектров усиления градиентно-активированных кристаллов LiNbO<sub>3</sub>:Er и LiNbO<sub>3</sub>:Er(Ce,Zn). На рисунке 13 (а, б) представлены рассчитанные по формуле Фюхтбауэра–Ладенбурга (8) спектры сечений поглощения и излучения исследуемых градиентно-активированных кристаллов.

$$\sigma_{em} = W_{ra} \frac{\lambda^5 I(\lambda)}{8\pi c n^2 \int \lambda I(\lambda) d\lambda}, \quad (8)$$

где  $W_{ra} = 1/\tau$  – скорость радиационного распада возбужденного состояния;  
 $I(\lambda)$  – спектр излучения оптических центров;  
 $c$  – скорость света;  
 $n$  – показатель преломления исследуемого образца.

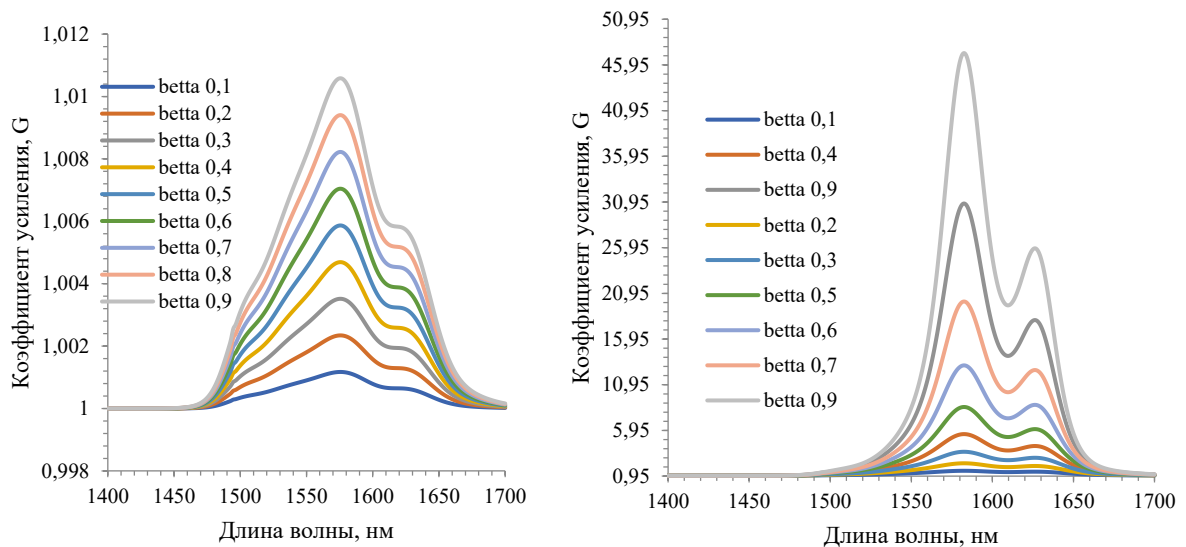


**Рисунок 13** – Спектры сечения поглощения и излучения градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  (а) и сравнение спектров сечения излучения кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Ce}$  (б) [9]

Наряду со спектрами сечений переходов были рассчитаны коэффициенты усиления оптического сигнала  $G$  исследуемых образцов для идеализированного резонатора Фабри-Перо (9).

$$G = \exp(2m\sigma_{em}nl) , \quad (9)$$

где  $m$  – число полных проходов излучения в объеме резонатора;  
 $\sigma_{em}$  – спектр сечения излучения;  
 $n$  – концентрация ионов Er в возбужденном состоянии;  
 $l$  – длина активного элемента.

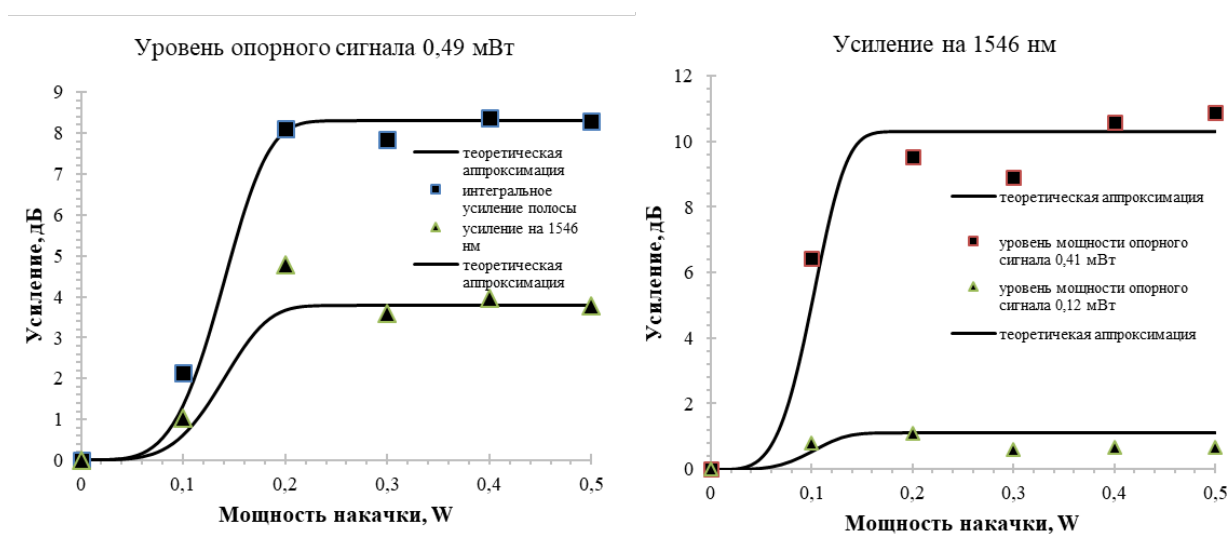


**Рисунок 14** – Спектры коэффициентов усиления оптических сигналов при условии 5-ти полных проходов излучения накачки в оптическом резонаторе для градиентно-активированных кристаллов: а)  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  ; б)  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  [9]

Результат, представленный на рисунке 14, получен с учетом изменения времени жизни возбужденного состояния оптических центров относительно концентрационного профиля, а также с учетом изменения концентрации ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$  относительно продольной координаты кристалла, совпадающей с направлением распространения оптической накачки в активном лазерном элементе.

В разделе 4.3 проведен сравнительный анализ параметров 1,5 мкм генерации для однородно легированных и градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ . Выявлено, что величина интенсивности пороговой мощности накачки градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  составляет величину порядка  $0,5 \text{ kW/cm}^2$  и является минимальной по отношению к аналогичным параметрам для кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  с постоянной концентрацией оптических центров и промышленных оптических фосфатных стекол (для градиентно-активированных кристаллов интенсивность пороговой мощности накачки меньше на более чем 30 % по отношению к фосфатным стеклам) [1, 2].

Раздел 4.4 посвящен экспериментальному исследованию спектров усиления градиентно-активированных образцов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ . На рисунке 15 представлены примеры кривых усиления оптического сигнала для градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ . В таблице 2 приведены сравнительные энергетические параметры для градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ .



**Рисунок 15** – Примеры кривых усиления градиентно-активированных кристаллов, полученные в произвольных координатах и при различных условиях:  
 а)  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ ; б)  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$

Приведенный в таблице 2 параметр  $\eta$  представляет собой величину эффективности переноса энергии электронного возбуждения от доноров  $\text{Yb}^{3+}$  к акцепторам  $\text{Er}^{3+}$ , рассчитанную в рамках модели прыжкового механизма переноса энергии электронного возбуждения. Значение параметра было получено без учета процесса обратного переноса энергии на ионы  $\text{Yb}^{3+}$  и процесса ап-конверсии на энергетический уровень  $^4\text{S}_{3/2}$ . Как видно из представленных экспериментальных данных, величины коэффициента усиления градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  не коррелируют с величиной параметра  $\eta$ . Это означает, что в теоретических расчетах энергетических параметров переноса энергии электронного

возбуждения необходимо учитывать все возможные каналы, которые вносят основной вклад в процесс релаксации электронного возбуждения на акцепторах  $\text{Er}^{3+}$ .

**Таблица 2** – Сравнение энергетических параметров градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  для его различных координат [1,2,5]

№ п/п	Концентрация Yb, ат. %	Концентрация Er, ат. %	Эффективность переноса энергии $\eta$ , %	Диапазон коэффициента усиления сигнала, дБ	Порог генерации, P, Вт
1	-	1,59	-	2–8	0,98
2	0,85	0,19	11,5	4–12	0,165
3	0,69	0,26	11,7	14–18	0,21

Таким образом, исследования градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  показали, что в изучении эффективности оптических материалов в области 1,5 мкм в системе взаимодействующих центров  $\text{Yb}^{3+} \leftrightarrow \text{Er}^{3+}$  в теоретической модели необходимо учитывать процессы ап-конверсии (квантовая эффективность составляет порядка 12 % от поглощенной энергии), а также процессы обратного переноса энергии электронного излучения на ионы доноров  $\text{Yb}^{3+}$ .

Полученные и представленные в таблице 2 пороговые значения мощности градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  в рамках разработанной модели, учитывающей основные процессы взаимодействия примесных центров (обратный перенос, ап-конверсия), коррелируют с экспериментальными данными по усилению исследуемого образца.

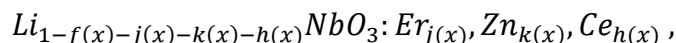
### **Основные научные результаты работы состоят в следующем:**

1 Из приведенного обзора известных кристаллических матриц, легированных ионами Yb, Er и использующихся для получения 1,5 мкм генерации, можно сделать вывод, что задача разработки и получения эффективной лазерной среды, конкурентоспособной фторидным стеклянным матрицам, легированным ионами  $\text{Er}^{3+}$ , на сегодняшний день не решена. Использование в качестве ионов-релаксантов примеси  $\text{Ce}^{3+}$  усложняет технологический процесс получения кристаллов высокого оптического качества, приводит к появлению различных кристаллических дефектов и снижает квантовую эффективность лазерной среды и КПД усилителей и лазеров.

2 Использование в качестве оптической матрицы градиентно-активированных кристаллов ниобата лития имеет высокий потенциал для разработки и получения многоканальных фотонных устройств, построенных по принципу генерации суммарных и разностных частот. Однако сложные процессы безызлучательного взаимодействия между оптическими ионами требуют проведения исследований по изучению влияния прямого и обратного переноса энергии с целью определения оптимально эффективных концентраций ионов  $\text{Yb}^{3+}$  и/или  $\text{Er}^{3+}$  в кристаллах ниобата лития [3].

3 Проведено моделирование процессов подпитки расплава различными компонентами ( $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ) в разработанном способе получения градиентно-активированных кристаллов на основе ниобата лития [7].

4 На основании проведенного физико-математического моделирования получены лабораторные образцы градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с общей химической формулой:



где  $j(x)$  – концентрационный профиль оптических центров ионов  $Er^{3+}$  (от 0,02 ат.% до 0,3 ат.%; от 4,1 ат.% до 2,1 ат.% и от 2,7 ат.% до 1,8 ат.%);  
 $k(x)$  – концентрационный профиль нефоторефрактивной примеси ионов  $Zn^{2+}$  (от 2 ат.% до 1,6 ат.%);  
 $h(x)$  – концентрационный профиль примеси ионов  $Ce^{+3}$  (от 0 ат.% до 0,3 ат.% и от 0,3 ат.% до 0,4 ат.%).

5 Проведены спектрально-люминесцентные исследования градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с реализованным одним или двумя (одновременно) концентрационными профилями оптических примесей ионов  $Yb^{3+}$  и/или  $Er^{3+}$  и  $Ce^{3+}$  и/или  $Zn^{2+}$ . Исследования поглощения градиентно-активированных кристаллов показали, что интегральные интенсивности поглощенной энергии  $E$ ,  $см^{-1}$  полностью коррелируют с концентрационными профилями оптических центров и имеют одинаковый вид функций распределения относительно продольной координаты кристалла. Исследования спектров люминесценции показали, что изменение интегральной интенсивности излучения идентично изменениям в процессе поглощения в градиентно-активированных кристаллах с концентрационным профилем ионов  $Er^{3+}$  относительно продольной координаты кристалла. При наличии одновременно двух концентрационных профилей оптических центров  $Yb$  и  $Er$  функция зависимости интегральной интенсивности излучения от координаты кристаллического  $I_{Er}(x)$  образца в области 520 нм (процесс ап-конверсии ионов  $Er^{3+}$ ) полностью повторяет вид распределения функции концентраций оптических центров в зависимости от продольной координаты кристалла  $N_{Er}(x)$ . При исследованиях излучения градиентно-активированного кристалла  $LiNbO_3:Yb,Er$  в области 1,5 мкм функция зависимости интегральной интенсивности излучения от координаты кристалла  $I_{Er}(x)$  не коррелирует с концентрационным профилем оптического центра  $N_{Er}(x)$ , а имеет функциональную зависимость, коррелирующую с видом с концентрационного профиля доноров  $N_{Yb}(x)$ .

6 Проведена количественная оценка оптической мощности процесса излучения в спектральной области 1,5 мкм при оптической накачке полупроводниковым лазером с длиной волны генерации 980 нм. Выявлено, что квантовая эффективность излучения в области 1,5 мкм составляет величину порядка 70 %.

7 Для градиентно-активированных кристаллов  $LiNbO_3:Er(Ce,Zn)$  с концентрационными профилями  $Ce$  и/или  $Zn$  выявлен характер изменения спектров люминесценции ионов  $Er^{3+}$  в области 3 мкм. Обнаружено, что в исследуемых образцах интегральная интенсивность излучения в области 3 мкм полностью коррелирует с изменением концентрационного профиля оптических центров  $Er$  вдоль продольной координаты кристаллов. В градиентно-активированных кристаллах  $LiNbO_3:Er,Zn$  происходит смещение максимума спектральной полосы в коротковолновую область по сравнению с градиентно-активированными кристаллами  $LiNbO_3:Er$  и  $LiNbO_3:Er,Ce$ .

8 Проведены кинетические исследования градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce,Zn})$ . Выявлено, что для кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  кинетики затухания люминесценции имеют экспоненциальный вид с характерным временем жизни возбужденного состояния  $\sim 2$  мс. Наличие концентрационного профиля оптических центров ионов  $\text{Er}^{3+}$  оказывает влияние на изменение люминесцентного времени жизни  $\text{Er}$  при комнатной температуре в области 1,5 мкм. Объяснение такого изменения связано с изначально высокой концентрацией оптических центров  $\text{Er}$ , что определяет наличие большой вероятности пленения возбуждения соседними примесными центрами и высокую вероятность обменных внутрицентровых процессов [9].

9 Кинетики затухания люминесценции возбужденных состояний градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ , измеренные в диапазоне 1,5–1,68 мкм, имеют неэкспоненциальный вид с наличием области разгорания и/или области резкого сброса энергии электронного возбуждения. Такие кинетики затухания люминесценции представляют собой суперпозицию нескольких экспоненциальных процессов с различными характеристическими временами. Среднее время жизни возбужденного состояния является характерным для  $\text{Yb-Er}$  сред и равно  $\sim 2,6$  мс. Изменение люминесцентного времени жизни градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  не имеет ярко выраженной корреляции с концентрационными профилями оптических центров, что объясняется наличием нескольких релаксационных каналов электронного возбуждения (как излучательных, так и безызлучательных) и высокой степенью донорно-акцепторного взаимодействия  $\text{Yb} \leftrightarrow \text{Er}$  [1, 9].

10 Исследованы кинетики затухания люминесценции градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce,Zn})$ . Получено, что при сенсбилизации оптических материалов, активированных  $\text{Er}^{3+}$  ионами  $\text{Zn}$ , происходит снижение люминесцентного времени жизни возбужденного состояния  ${}^4\text{I}_{13/2} \text{Er}^{3+}$ , аналогично тому как ионы релаксаторы  $\text{Ce}^{3+}$  влияют на длительность возбужденного состояния ионов  $\text{Er}^{3+}$ . Полученные градиентно-активированные кристаллы  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce,Zn})$  демонстрируют снижение люминесцентного времени жизни возбужденного состояния  $\text{Er}^{3+} {}^4\text{I}_{13/2}$  до  $\tau = 480\text{--}500$  мкс, что может быть объяснено наличием нескольких неэквивалентных кристаллографических позиций ионов  $\text{Er}^{3+}$  [9].

11 Проведены кинетические исследования процессов затухания люминесценции оптических центров градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  в рамках прыжкового механизма Ферстера–Декстера–Галанина. Рассчитаны микропараметры процесса переноса энергии электронного возбуждения и эффективность переноса энергии между донорами ( $\text{Yb}^{3+}$ ) и акцепторами ( $\text{Er}^{3+}$ ) при условии концентрационных профилей оптических центров в градиентно-активированном кристалле без учета процессов обратного переноса энергии и процесса ап-конверсии.

Выявлено, что скорость переноса энергии электронного возбуждения имеет функциональную зависимость от продольной координаты градиентно-активированного кристалла и в области концентраций акцепторов  $\text{Er}$  от  $4 \cdot 10^{19}$  до  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и доноров  $\text{Yb}$  от  $1,2 \cdot 10^{20}$  до  $0,9 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  характеризуется эффектом насыщения, что определяет оптимальный диапазон концентраций доноров и акцепторов для полученного лабораторного образца активного лазерного элемента на основе градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ .

12 Проведен сравнительный анализ генерационных параметров градиентно-активированных кристаллов и однородно легированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ . Установлено, что величина интенсивности пороговой мощности накачки градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  составляет величину порядка  $0,5 \text{ kW/cm}^2$  и является минимальной по

отношению к аналогичным параметрам для кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  с постоянной концентрацией оптических центров и промышленных оптических фосфатных стекол (для градиентно-активированных кристаллов интенсивность пороговой мощности накачки меньше на более чем 30 % по отношению к фосфатным стеклам).

13 Получены спектры сечений излучения и коэффициентов усиления градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce,Zn})$ . Рассчитанные коэффициенты усиления оптических сигналов для градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  демонстрируют превышение в несколько раз величины коэффициента усиления градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ . Для кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce,Zn})$  наблюдается рост эффективного сечения излучения и коэффициента усиления оптического сигнала более чем на 30 % по сравнению с кристаллами  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  в области 1,5 мкм.

Полученные спектры коэффициентов усиления оптических сигналов градиентно-активированных кристаллов и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  демонстрируют увеличение эффективности процесса генерации в области 1,5 мкм не менее чем на 20 % по сравнению с кристаллами и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Ce}$  с постоянной концентрацией примесных центров.

14 Разработан макет оптического усилителя и лазера с активным элементом, выполненным на основе оптического градиентно-активированного кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ . Выявлено, что при концентрациях ионов  $\text{Yb}$  0,85 ат.% и  $\text{Er}$  0,19 ат.% коэффициент усиления оптического сигнала находится в диапазоне значений 4–12 дБ, а пороговое значение мощности оптического сигнала при развитии генерации (порог генерации) составляет 0,16 Вт. При концентрациях оптических центров  $\text{Yb}$  0,69 ат.% и  $\text{Er}$  0,26 ат.% пороговое значение мощности оптического сигнала возрастает до 0,21 Вт, при этом коэффициент усиления находится в пределах значений от 14 до 18 дБ.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Increasing pumping efficiency by using gradient-doped laser crystals [Text] / E. V. Strogonova, V. V. Galutskiy, D. S. Tkachev, N. N. Nalbantov, A. A. Tsema, N. A. Yakovenko // Journal of Optics and Spectroscopy. – Т. 117. – 2014. – Р. 984–989.
2. Галуцкий, В. В. Сравнительные генерационные характеристики 1,5 мкм излучения в кристаллах  $\text{Er,Yb:LiNbO}_3$  [Текст] / В. В. Галуцкий, Н. Н. Налбантов, А. А. Цема [и др.] // XXII Международная конференция «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». – Краснодар : ООО «ПринтТерра», 2016. – С. 243–250.
3. Галуцкий, В. В. Исследование параметров формирования доменной структуры в градиентном ниобате лития [Текст] / В. В. Галуцкий, С. А. Шмаргилов, А. А. Цема [и др.] // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2015. – № 4. – С. 37–42.
4. Галуцкий, В. В. Лазерные кристаллы с заданным распределением оптической примеси [Текст] / В. В. Галуцкий, В. А. Чернявский, А. А. Цема [и др.] // Научно-техническая конференция-семинар по фотонике и информационной оптике НИЯУ МИФИ. – М. : Типография НИЯУ МИФИ, 2011. – С. 124–125. – ISBN 978-5-7262-1390-3.
5. Галуцкий, В. В. Увеличение эффективности накачки при использовании градиентно-сенсублизированных лазерных кристаллов [Текст] / В. В. Галуцкий, Д. С. Ткачев,

- Н. Н. Налбантов, А. А. Цема [и др.] // Оптика и спектроскопия. – 2014. – Т. 117. – № 6. – С. 1012–1017.
6. Галуцкий, В. В. Расчет спектрально-кинетических параметров оптических центров с сильным пересечением полос люминесценции [Текст] / В. В. Галуцкий, К. В. Судари-ков, А. А. Цема [и др.] : Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013617063.
  7. Монокристаллический материал с неоднородным распределением оптических приме-сей для активного лазерного элемента : пат. № 2591253, заявка № 2015116782, приори-тет изобретения 30 апреля 2016 г. Рос. Федерация / Строганова Е. В., Галуцкий В. В., Налбантов Н. Н., Цема А. А., Яковенко Н. А. ; опубли. бюл. № 20 (2016).
  8. Чернявский, В. А. Изучение влияния концентрационного профиля доноров и акцепто-ров на генерационные параметры твердотельных эрбиевых лазеров [Текст] / В. А. Чер-нявский, А. А. Цема [и др.] // Современные проблемы физики, биофизики и информа-ционных технологий : материалы Всероссийской заочной научно-практической конфе-ренции. – Краснодар : Краснодарский ЦНТИ – фил. ФГБУ «Российское энергетическое агентство», 2010. – С. 147–157.
  9. Гринёв, А. А. Изучение люминесцентно-кинетических свойств различных оптических материалов, легированных редкоземельными элементами Yb и Er [Текст] / А. А. Гри-нёв, Я. М. Лукьянченко, А. А. Цема, В. В. Галуцкий, Е. В. Строганова [и др.] // Ученые Записки Физического Факультета МГУ. – 2019. - № 1. – С. 1910402-1 – 1910402-7.
  10. Градиентно-сенсibilизированные лазерные среды [Текст] : рекламно-техническое описание НИР (заключит.) : Кубанский государственный университет : рук. Строганова Е.В. ; исполн. : Цема А.А. [и др.]. – Краснодар. – 2011. – 10 с. – Библиогр. : с. 10. – № ГР 012010 55563 . – Инв. № 02201259043.

#### **СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Story Behind FiberHome’s 560 Tbit/s optical transmission system [Electronic resource] // Fi-berHome. – Electronic text data. – URL : <http://www.fiberhome.com/en/news/9/93.aspx>.
2. Леонов, А. В. Усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния в опти-ческих системах связи [Текст] / А. В. Леонов, О. Е. Наний, В. Н. Трещиков // Приклад-ная фотоника. – 2014. – № 1. – С. 26–49.
3. Okhrimchuk, A. G. Femtosecond laser writing in the monoclinic RbPb<sub>2</sub>Cl<sub>5</sub>:Dy<sup>3+</sup> crystal / A. G. Okhrimchuk [et al.] // Optical Materials. – 2015. – V. 43. – P. 1–5.
4. Романов, А. Н. Широкополосная ИК-фотолюминесценция легированного висмутом ио-дида TlCdI<sub>3</sub> / А. Н. Романов [и др.] // Химическая физика. – 2017. – Т. 36. – № 1. – С. 27–31.
5. Sgibnev, Y. M. Luminescence of silver clusters in ion-exchanged cerium-doped photo-termo-refractive glasses / Y. M. Sgibnev, N. V. Nikonov, A. I. Ignatiev // Journal of Lumines-cence. – 2016. – V. 176. – P. 292–297.
6. Klyukin, D. A. Formation of luminescent and nonluminescent silver nanoparticles in silicate glasses by near-infrared femtosecond laser pulses and subsequent thermal treatment: the role halogenides / D. A. Klyukin [et al.] // Optical Engineering. – 2016. – V. 55. – № 6. – P. 067101.
7. Курков, А. С. Мощные волоконные ВКР-лазеры в диапазоне 1,22–1,34 мкм [Текст] / А. С. Курков, Е. М. Дианов, В. М. Парамонов [и др.] // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – № 9. – С. 791.



8. Афонин, С.В. Разработка в ИОА СО РАН базы данных региональной спутниковой информации и программного обеспечения для ее обработки / С.В. Афонин, В.В. Белов, М.В. Энгель, А.М. Кох // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т.18. – № 1 – 2. – С. 52-60
9. Специальные системы. Фотоника [Электронный ресурс]. – URL : <https://sphotronics.ru/catalog/tverdotelnye-lazery-s-diodnoy-nakachkoj-dpss/>.
10. Гибридные лазеры в среднем ИК диапазоне: IPG PHOTONICS [Электронный ресурс]. – URL : <https://www.ipgphotonics.com/ru/products/lasers/gibridnye-lazery-v-srednem-ik-dia-pazo#obzor-2>.
11. Mirov, S. B. Progress in Mid-IR Lasers Based on Cr and Fe-Doped II–VI Chalcogenides [Text] / S. B. Mirov, V. V. Fedorov, D. Martyshkin [et al.] // Ieee journal of selected topics in quantum electronics. – 2015. – Vol. 21. – № 1. – Jan.–Feb. – P. 1601719.
12. Гладкий, В.П. Элементы волноводной оптоэлектроники для устройств функциональной обработки цифровой информации / В.П. Гладкий, В.А. Никитин, В.П. Прохоров, Н.А. Яковенко // Квантовая электроника. – 1995. – Т.22. – № 10. – С. 1027 – 1033.
13. Vasilyev, S. Multi-Watt mid-IR femtosecond polycrystalline Cr<sup>2+</sup>:ZnS and Cr<sup>2+</sup>:ZnSe laser amplifiers with the spectrum spanning 2.0–2.6 μm [Text] / S. Vasilyev, I. Moskalev, M. Mirov [et al.] // Optical Society of America Received. – 2015. – Nov 3; revised 23 Dec 2015; accepted 29 Dec 2015; published 21 Jan 2016 – 2016 OSA 25 Jan 2016. – Vol. 24. – № 2. – DOI:10.1364/OE.24.001616. – OPTICS EXPRESS 1616.
14. Full characterization of modern transmission fibers for Raman amplified-based communication systems [Text] / C. Jiang, B. Bristiel, Y. Jaouën [et al.] // Optics Express. – 2007. – Vol. 15. – № 8. – P. 4883–4892.
15. Кузьминов, Ю. С. Ниобат и танталат лития – материалы для нелинейной оптики [Текст] / Ю. С. Кузьминов. – М. : Наука, 1975. – 224 с.
16. Сидоров, Н. В. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны [Текст] / Н. В. Сидоров [и др.]. – М. : Наука. – 2003. – 250 с.
17. Палатников, М. Н. Радиационная стойкость нелинейно-оптических кристаллов ниобата лития, легированных Y, Gd и Mg [Текст] / М. Н. Палатников [и др.] // Неорганические материалы. – 2013. – Т. 49. – № 8. – С. 880.
18. Способ выращивания монокристаллов с заданным распределением примесей по его длине : пат. № 24026446 Рос. Федерация, МПК (51) С30В 15/20, С30В 15/02, С30В 15/12 / Галуцкий В. В., Строганова Е. В. ; опубл. бюл. № 30 (2010).
19. Сидоров, Н. В. Спектры КР фоторефрактивных монокристаллов ниобата лития [Текст] / Н. В. Сидоров, А. А. Яничев, П. Г. Чуфырев // Журнал прикладной спектроскопии. – 2010. – Т. 77. – № 1. – С. 119–123.
20. Строганова, Е. В. Исследование и синтез градиентно-активированных кристаллов на основе ниобата лития : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – 01.04.05 – Оптика. [Текст] / Елена Валерьевна Строганова ; Кубанский государственный университет. – Краснодар : КубГУ, 2017. – 41 с.
21. Jackson, S. D. Diode-pumped 1,7-W erbium 3-μm fiber laser [Text] / S. D. Jackson, T. A. King, M. Pollnau // Optics Letters. – 1999. – Vol. 24. – P. 1133–1135.