

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Цема Александра Алексеевича «Спектрально-люминесцентные  
и кинетические исследования градиентно-активированных кристаллов  
ниобата лития с оптическими центрами  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ », представленной на  
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.05 – Оптика

**Актуальность темы.** Разработка новых устройств фотоники и оптоэлектроники стимулирует фундаментальные исследования, направленные на модифицирование и создание новых нелинейно-оптических материалов. 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. В качестве объекта исследований в работе выступают оптические градиентно-активированные кристаллы ниобата лития, легированные редкоземельными элементами  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$ , которые традиционно используются как ионы-активаторы оптических материалов с целью получения излучения в области 1,5 и 3 мкм. Исследования градиентно-активированных кристаллов с заданным нелинейным распределением примесных центров  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$  направлены на решение актуальной научной и практической задачи, связанной с увеличением эффективности продольной оптической накачки лазерного элемента. С целью повышения лучевой стойкости кристаллов ниобата лития к лазерному воздействию в диссертационной работе исследованы градиентно-активированные кристаллы  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ , легированные нефоторефрактивной примесью и  $\text{Zn}^{2+}$ .

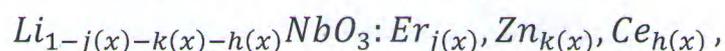
В связи с этим диссертация Цема А. А., обобщающая результаты экспериментальных и теоретических исследований оптических градиентно-активированных кристаллов ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ ;

LiNbO<sub>3</sub>:Er(Ce,Zn)), несомненно является актуальной и имеющей перспективу прикладного применения.

**Научная новизна и практическая значимость исследований.** В диссертации Цема А. А. представлены результаты, обладающие научной новизной, имеющие практическую значимость:

- проведено физико-математическое моделирование процесса подпитки расплава с целью получения градиентно-активированных кристаллов ниобата лития LiNbO<sub>3</sub> с одним или одновременно двумя концентрационными профилями примесных центров Li<sup>+</sup>, Nb<sup>5+</sup>, Mg<sup>2+</sup> (Zn<sup>2+</sup>);

- впервые получены лабораторные образцы градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с нефоторефрактивной примесью Zn<sup>2+</sup> с целью улучшения лучевой стойкости кристалла:



где  $j(x)$  – функция зависимости концентрации оптических центров ионов Er<sup>3+</sup> от продольной координаты кристалла;

$k(x)$  – функция зависимости концентрации оптических центров ионов Zn<sup>2+</sup> от продольной координаты кристалла;

$h(x)$  – функция зависимости концентрации оптических центров ионов Ce<sup>3+</sup> от продольной координаты кристалла;

- проведены спектрально-кинетические исследования градиентно-активированных кристаллов LiNbO<sub>3</sub>:Er(Ce,Zn) и установлены закономерности влияния концентрационных профилей Ce и Zn, связанные со снижением характерного люминесцентного время жизни Er<sup>3+</sup>;

- проведены исследования генерационных параметров градиентно-активированных кристаллов LiNbO<sub>3</sub>:Yb,Er, LiNbO<sub>3</sub>:Er и LiNbO<sub>3</sub>:Er(Ce,Zn).

- разработан макет активного лазерного элемента на основе градиентно-активированного кристалла с реализацией одновременных концентрационных профилей оптических центров ионов Yb<sup>3+</sup> и Er<sup>3+</sup>.

Разработанные макеты оптического усилителя и лазера на базе градиентно-активированных кристаллов LiNbO<sub>3</sub>:Yb,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.

### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.**

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается большим объемом экспериментальных данных, корректностью использования широкого комплекса современных высокоэффективных методов изучения оптических свойств с применением статистической обработки данных, авторскими методическими разработками по повышению точности проведения исследований, сопоставлением полученных данных с известными экспериментальными результатами подобных изысканий, анализирующих кристаллы ниобата лития с однородным легированием примесями оптических центров.

Научные исследования, представленные в диссертации, проводились в рамках фундаментальных НИР различного уровня (ФЦП, РФФИ, госзадание Минобрнауки РФ).

Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на многочисленных конференциях и научных семинарах, опубликованы в 10 научных работах (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).

### **Рекомендации по использованию результатов диссертации.**

Прикладной аспект научных исследований Цема А. А. напрямую связан с созданием новых оптических компонентов для информационных сетей и систем связи. Результаты диссертационной работы представляют интерес для учреждений РАН, предприятий, специализирующихся на создании приборов фотоники и оптоэлектроники.

### **Краткая характеристика основного содержания диссертации.**

Диссертация Цема А. А. состоит из введения, 4 глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы.

Во введении обосновывается актуальность диссертационного исследования, формулируется цель и основные задачи работы. Представлено описание предлагаемого автором подхода к решению поставленных задач, характеризуется степень новизны полученных результатов и их апробация.

В первой главе рассмотрены спектрально-люминесцентные и оптические характеристики эффективных твердотельных матриц для генерации в области 1,5 мкм, в том числе световодов, легированных

оптическими центрами  $\text{Yb}^{3+}$  и/или  $\text{Er}^{3+}$ , с указанием ограничений для волоконных лазеров с целью создания высокомоощных лазерных систем. В главе описаны физико-химические и оптические свойства кристаллов ниобата лития. Указано, что 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.

Во второй главе описаны объекты и методы исследований. Рассмотрен способ получения градиентно-активированных оптических монокристаллов, проведено моделирование процессов выращивания градиентно-активированных кристаллов с различными вариантами концентрационных профилей примесных центров как функции подпитки расплава. В рамках выполненного моделирования градиентно-активированных кристаллов были получены лабораторные образцы монокристаллов ниобата лития с различными концентрационными примесями оптических центров:  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$ .

Третья глава диссертации 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. Определено влияние концентрационных профилей примесных центров на спектрально-люминесцентные свойства исследуемых градиентно-активированных кристаллов. Кинетические исследования градиентно-активированных образцов определили зависимости люминесцентного времени жизни от концентрационных профилей оптических центров. Обнаружено, что в кристаллах  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ ;  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$  возможно наличие двух неэквивалентных оптических центров  $\text{Er}^{3+}$ , при этом в кристаллах  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$  наблюдается значительное снижение люминесцентного времени жизни возбужденного состояния оптических центров  $\text{Er}^{3+}$ .

В четвертой главе представлены исследования квантовой эффективности градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ . Определены микропараметры процесса переноса энергии

электронного возбуждения и эффективность переноса энергии между донорами ( $\text{Yb}^{3+}$ ) и акцепторами ( $\text{Er}^{3+}$ ) при наличии концентрационных профилей оптических центров в градиентно-активированном кристалле без учета обратного процесса переноса энергии и процесса ап-конверсии. Проведены исследования спектров сечений поглощения, излучения и расчеты спектров усиления градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$ , рассчитаны коэффициенты усиления оптического сигнала исследуемых образцов для идеализированного резонатора Фабри-Перо. Проведен сравнительный анализ параметров 1,5 мкм генерации для однородно легированных и градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ .

Проведены экспериментальные исследования спектров усиления оптических сигналов в градиентно-активированных образцах  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ . Разработан макет лазера на активном элементе кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$  с полуконфокальным резонатором. Изучены спектры генерационного излучения градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ .

В целом диссертация Цема А. А. является законченным исследованием, в котором представлено решение актуальных научных задач в области оптического материаловедения и лазерной физики.

Однако к работе имеются следующие **замечания**:

- 1 При спектрально-люминесцентных и кинетических исследованиях градиентно-активированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ ;  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$  была высказана гипотеза о наличии двух неэквивалентных оптических центров  $\text{Er}^{3+}$ . Однако в работе не представлены результаты детального изучения структуры исследуемых образцов относительно наличия центров ионов  $\text{Er}$  в различных кристаллографических позициях.
- 2 При изучении кривых усиления оптических сигналов градиентно-активированных кристаллов исследовались области кристаллических пластинок с постоянной концентрацией оптических центров. Так как определенный научный интерес имеют экспериментальные исследования с лазерным элементом, в котором реализованы концентрационные профили оптических центров,

постановка серии таких экспериментов позволила бы определить влияние концентрационных профилей на качество оптического излучения.

3. В работе не представлены результаты по исследованию спектров генерационного излучения и усиления опорного сигнала кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$ .
4. В части представления кинетических исследований градиентно-активированных кристаллов не показана температурная зависимость люминесцентного времени жизни возбужденного состояния оптических центров  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$ .

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования Цема А.А.

**Общее заключение.** Основные результаты диссертации опубликованы в 10 научных работах, в том числе 3 статьи в научных журналах из перечня ВАК, 1 статья в журнале БД Scopus, 1 патент и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Результаты диссертационного исследования прошли апробацию на нескольких международных конференциях и являются результатами выполнения НИР по грантам различного уровня.

Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают основное содержание диссертации, характеризуют результаты проведенных исследований.

Уровень решаемых задач представляется соответствующим требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Содержание диссертации соответствует специальности 01.04.05 – Оптика.

Считаю, что диссертация Цема Александра Алексеевича «Спектрально-люминесцентные и кинетические исследования градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с оптическими центрами  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ » удовлетворяет критериям актуальности, научной новизны, обоснованности и достоверности выводов, предъявляемым к кандидатским диссертационным работам «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительством Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (редакция от 01.10.2018 г.) (пп. 9 – 14), а

ее автор, Цем Александр Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 - Оптика.

Официальный оппонент

директор НИИ физики

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

доктор физико-математических наук,

(01.04.07 – Физика конденсированного состояния)



И. А. Вербенко

Вербенко Илья Александрович

НИИ физики ФГАОУ ВО

«Южный федеральный университет»

344090, г. Ростов-на-Дону,

пр. Стачки, д. 194

тел.: +7(863)2433676

факс: +7(863)2434044

ilich001@ya.ru

<https://ip.sfedu.ru>

НИИ физики ЮФУ

Исх. № 604/350

от 26.09 2019 г.