

Изучение люминесцентно-кинетических свойств различных оптических материалов, легированных редкоземельными элементами Yb и Er

А. А. Гринёв¹, Я. М. Лукьянченко¹, А. А. Цема¹, В. В. Галуцкий¹,
Е. В. Строганова^{1,*}, В. Ф. Шульгин^{2,†}, А. А. Гусев²

¹Кубанский государственный университет, физико-технический факультет, кафедра оптоэлектроники
Россия, 350040, Краснодар, ул. Ставропольская, д. 49

²Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского,
Таврическая академия, факультет биологии и химии,
кафедра общей и физической химии. Россия, 295007,
Республика Крым, Симферополь, пр. академика Вернадского, д. 4
(Статья поступила 15.05.2018; Подписана в печать 22.01.2019)

Изучены люминесцентно-кинетические свойства в области 1.5 мкм градиентно-активированных кристаллов ниобата лития, неоднородно сенсibilизированных оптическими ионами Er^{3+} и примесными центрами Ce^{3+} , Zn^{2+} , а также синтезированные органические координационные соединения с оптическими центрами ионов Yb^{3+} и Er^{3+} . В результате исследований было получено, что в образцах, сенсibilизированных ионами Ce^{3+} , наблюдается снижение люминесцентного времени жизни возбужденного состояния ${}^4\text{I}_{13/2}$ оптических центров Er^{3+} . В органических координационных соединениях оптические центры ионов эрбия также демонстрируют снижение люминесцентного времени жизни возбужденного состояния. Установлено, что снижение люминесцентного времени жизни оптического центра Er в области 1.5 мкм для кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}, \text{Ce}$ по сравнению с аналогичными значениями в $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ определяется наличием в матрице ионов-релаксаторов Ce^{3+} и переносом энергии электронного возбуждения между примесными центрами. Концентрационный профиль ионов Zn^{2+} в кристаллической матрице ниобата лития может потенциально создавать условия формирования неэквивалентных оптических центров для ионов Er аналогично тому, как оказывают воздействие на оптические центры ионы нефоторефрактивной примеси Mg^{2+} . В исследуемых органических координационных соединениях снижение времени жизни возбужденного состояния ионов Er^{3+} может быть объяснено обменными энергетическими процессами между оптическим центром и координационным органическим соединением, окружающим Er^{3+} .

PACS: 78.15.+e, 61.66.-f УДК: 538.93, 548.5, 547-3

Ключевые слова: градиентно-активированные кристаллы, органические координационные соединения, оптические центры, люминесцентное время жизни.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие сверхбыстродействующих инфокоммуникационных технологий и средств связи, процессы миниатюризации элементов интегрально-оптических систем определяют требования к разработкам высокоэффективных, многофункциональных компонентов фотоники и оптоэлектроники. Одним из перспективных материалов для разработки компонентной базы фотоники является сегнетоэлектрический кристалл ниобата лития [1–4]. Уровень эффективности и функциональности фотонных и оптоэлектронных устройств на базе ниобата лития зависит от степени совершенства структуры кристалла и его лучевой стойкости [5–7].

Дальнейшее развитие телекоммуникационных систем связано с расширением спектрального диапазона работы фотонных устройств. Базовым решением в этом направлении выступают разработки оптических элементов на основе нелинейных кристаллов ниобата лития, легированных редкоземельными элементами

(Yb, Er, Tm, Ho) [8–12]. Такие компоненты одновременно сочетают в себе лазерные и нелинейные свойства, а также возможность миниатюризировать фотонные устройства без потерь функциональных возможностей [13–17]. Перспективность направления разработки многофункциональных фотонных элементов и устройств на основе ниобата лития, легированного ионами Yb^{3+} и Er^{3+} , определяется не только развитием волоконно-оптических линий связи, но и атмосферных оптических линий связи, работающих на длинах волн в окнах прозрачности атмосферы (1.4–1.6 мкм и 3–5 мкм). Для получения эффективных фотонных устройств монокристаллы ниобата лития должны обладать заданными свойствами: иметь повышенную лучевую стойкость [18–20], быть легированными оптимальными концентрациями примесных центров и демонстрировать эффективные излучательные характеристики в заданном спектральном диапазоне.

В представленной работе проведено спектрально-кинетическое исследование градиентно-активированных кристаллов ниобата лития [21–23] с оптическими примесями ионов Er^{3+} , Yb^{3+} , а также изучено влияние на излучательные характеристики оптических центров Er^{3+} ионов релаксаторов Ce^{3+} . В качестве потенциальных активированных оболочек

*E-mail: stroganova@phys.kubsu.ru

†E-mail: ta.cfu@mail.ru

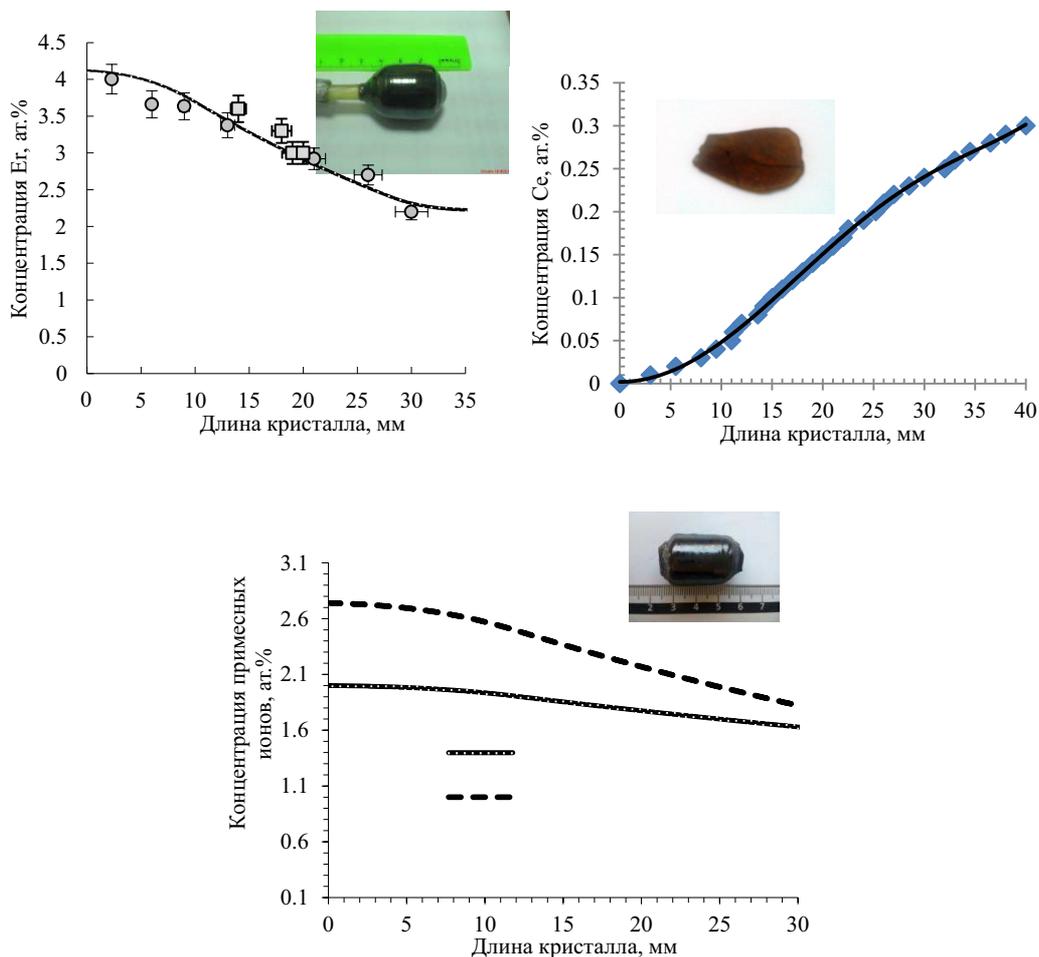


Рис. 1: Фото градиентно-активированных кристаллов и концентрационные профили примесных центров, реализованные в кристалле ниобата лития: *a* — фото градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ (вставка в верхнем углу) и концентрационный профиль оптической примеси Er^{3+} ; *б* — фото кристаллической отполированной пластинки выращенного кристалла и концентрационный профиль ионов-релаксаторов Ce^{2+} градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Ce}$ с постоянной концентрацией примеси Er^{3+} (0.015 ат.%); *в* — фото градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Zn,Ce})$ с концентрационными профилями примесных центров Er^{3+} и Zn^{2+} и постоянной концентрацией ионов Ce (0.05 ат.%)

чек для активного элемента оптического усилителя предлагается использовать комплексные органические соединения, легированные редкоземельными ионами Yb , Er (в качестве переизлучающих элементов) [24–26], которые были впервые получены в Таврической академии (структурное подразделение) ФГАО ВО «Крымский федеральный университет» (исследованы излучательные характеристики).

1. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В представленной работе проведены исследования люминесцентно-кинетических свойств градиентно-активированных кристаллов ниобата лития конгруэнтного состава $R = 0.94$ ($R = \text{Li/Nb}$) [20–23], в которых распределение концентраций примесных центров в объеме монокристалла является неоднородным

и имеет некоторую функциональную зависимость относительно продольной координаты кристалла (концентрационный профиль) (рис. 1, *a*, *б*, *в*). Концентрации оптических центров в произвольных координатах кристаллических пластинок, где производились исследования, представлены в табл. I.

Состав органических координационных соединений с примесью оптических центров Yb^{3+} и/или Er^{3+} представлен в табл. II. Из синтезированных порошкообразных соединений были получены образцы для исследований оптических свойств этих соединений путем их прессования с веществом КВг в различных соотношениях. Выбор связующего соединения был сделан исходя из условий его химической нейтральности с синтезированным веществом и оптической нейтральности в исследуемом спектральном диапазоне.

Для изучения оптических свойств экспериментальных образцов применялись стандартные методы опти-

Таблица I: Состав исследуемых кристаллических образцов конгруэнтного ниобата лития $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Ce,Zn}$

№ п/п	Кристаллическая матрица	Концентрация ионов Er, ат.%	Концентрация ионов Ce, ат.%	Концентрация ионов Zn, ат.%
1	$\text{LiNbO}_3:\text{Er}$	3	-	-
2	$\text{LiNbO}_3:\text{Er,Ce}$	0.015	0.2	-
3	$\text{LiNbO}_3:\text{Er,Zn,Ce}$	2.6	0.05	1.7

ческой спектроскопии. При рассмотрении кинетик затухания люминесценции исследуемых материалов использовался метод регистрации интенсивности дезактивации возбужденного состояния оптических центров после воздействия импульса лазерного излучения.

Таблица II: Состав органических координационных полимерных соединений

№ п/п	Структурная формула
1	$(\text{Er}+\text{Yb})(\text{dbm})_2$ Palm-Phen
2	$(\text{Er}+\text{Yb})(\text{hfa})_2$ Palm-Phen
3	$\text{Er}(\text{hfa})_2$ Palm-Phen
4	$\text{Er}(\text{dbm})_2$ Palm-Phen
5	$(\text{Er}+\text{Yb})(\text{acac})_2$ Palm-Phen

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 представлены примеры результатов исследований кинетик затухания люминесценции возбужденных состояний оптических центров в градиентно-активированном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ (фото кристалла и графическое представление концентрационного профиля (функция зависимости распределения концентрации примесных центров от продольной координаты кристалла) ионов Er^{3+} на рис. 1, а) и для образца органического полимерного соединения № 3 (состав соединения описан в табл. II). Как видно из представленных результатов, интенсивность затухания люминесценции возбужденных состояний оптических центров носит экспоненциальный характер и с высокой вероятностью описывается уравнением (1):

$$I = I_0 \exp(-t/\tau), \quad (1)$$

где I — интенсивность излучения; τ — люминесцентное время жизни возбужденного состояния оптического центра; t — текущее время.

Интерес к кристаллам, активированным ионами Er^{3+} и Ce^{3+} , связан с возможностью эффективного тушения уровня ${}^4\text{I}_{11/2}$, ответственного за излучение в области 2.9 мкм. Ион Ce^{3+} обладает высоким сечением перехода $\sim 10^{-18}$ см² между двумя энергетическими

уровнями — основным ${}^2\text{F}_{5/2}$ и возбужденным ${}^2\text{F}_{7/2}$, что создает возможность селективного поглощения излучения в области 3 мкм иона Er^{3+} и шунтирования его предлазерного энергетического уровня ${}^4\text{I}_{11/2}$ [27–29].

На рис. 3, а представлен пример одной из экспериментальных кинетик затухания люминесценции кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Ce}$, измеренной на длине волны 1570 нм. Наличие ионов Ce^{3+} создает условия для процесса безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения в системе $\text{Er} \rightarrow \text{Ce}$, поэтому экспериментальные данные были обработаны в рамках теории Ферстера–Декстера–Галанина в соответствии с аналитическим выражением для интенсивности затухания люминесценции возбужденного состояния в рамках прыжкового механизма (2).

$$I = I_0 \exp\left((-t/\tau) - \gamma\sqrt{t} - Wt\right), \quad (2)$$

где I — интенсивность излучения; τ — люминесцентное время жизни возбужденного состояния оптического центра; t — текущее время; γ — макропараметр переноса энергии $\text{Er} \rightarrow \text{Ce}$; W — вероятность миграции энергии электронного возбуждения к центрам тушения различной природы.

В табл. III представлены результаты по расчету параметров тушения электронного возбуждения оптических центров Er.

На рис. 3, б отображена кинетика затухания люминесценции оптических центров Er^{3+} в органическом координационном соединении, сенсibilизированном ионами Yb^{3+} в экспоненциальном и логарифмическом масштабе. Результаты исследований были обработаны в рамках теории Ферстера–Декстера–Галанина и наряду с макропараметрами переноса энергии электронного возбуждения градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Ce}$ представлены в табл. III.

Для определения степени влияния концентрационного профиля на люминесцентное время жизни оптических центров Er^{3+} были проведены исследования кинетик затухания люминесценции градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ в зависимости от концентрационного профиля оптических центров и продольной координаты кристаллической пластинки, вырезанной вдоль оси роста c . Результаты представлены на рис. 3, в.

Как видно из представленных результатов (рис. 3, в), люминесцентное время жизни Er^{3+} в градиентно-

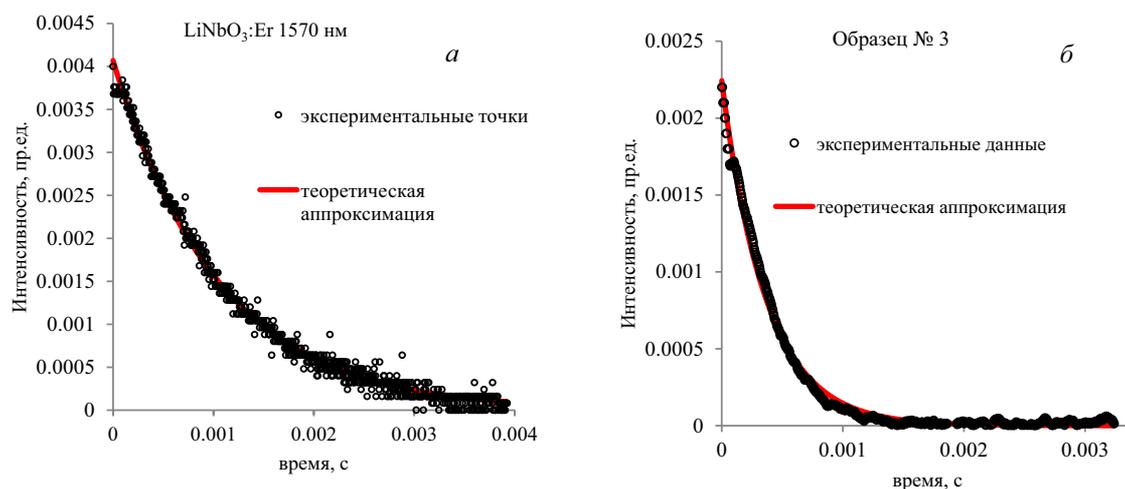


Рис. 2: Пример кинетик затухания люминесценции оптических центров Er в области 1.57 мкм: а — в кристалле ниобата лития; б — в полимерном органическом комплексе с оптическим центром Er

активированном кристалле LiNbO₃:Er коррелирует с концентрационным профилем оптических центров. Это полностью соответствует спектрально-люминесцентным исследованиям данного градиентно-активированного кристалла [20–22]. Такая корреляция может объясняться наличием межцентровых взаимодействий между оптическими центрами в кристаллографических позициях лития (ErLi) и ниобия (ErNb). Поскольку предельные концентрации достаточно высокие для исследуемого образца, то и вероятность обменных процессов между центрами достаточно высокая.

Таблица III: Параметры переноса энергии электронного возбуждения в исследуемых образцах

длина волны, нм	$\gamma, c^{-1/2}$	W, c^{-1}	$\tau, мкс$
LiNbO ₃ :Er,Ce			
1530	10	461.2	789.7
1550	4.93	115.4	949
1570	5	116.2	897.2
(Er+Yb)(hfa) ₂ Palm·Phen			
1600	10	120	410.4
LiNbO ₃ :Er,Ce,Zn			
1530	3.8	119.9	617.7
1550	5.1	323.1	745.8
1570	5.0	319.6	778.5
1600	5.2	304.7	747.5

Результаты исследования показали, что в кристаллах ниобата лития наблюдается снижение люминесцентного времени жизни оптического центра Er по сравнению с аналогичными значениями в LiNbO₃:Er ($\tau = 1.05$ мс). Данный результат может быть объяснен исходя из следующих позиций:

- наличие в кристаллической матрице ионов-релаксаторов Ce³⁺, которые имеют эффективное поглощение в области 3 мкм, что способствует обеднению предлазерного уровня Er и увеличивает вероятность 1.5 мкм излучательного перехода;
- наличие в кристаллической матрице ниобата лития наряду с ионами-релаксаторами Ce³⁺ ионов нефоторефрактивной примеси Zn²⁺. Можно сделать предположение, что ионы Zn²⁺ создают некоторые структурные дефекты аналогично тому, как проявляет себя в ниобате лития нефоторефрактивная примесь ионов Mg²⁺ [30]. Поскольку ионы Er³⁺ в кристаллах ниобата лития принципиально могут занимать кристаллографические позиции и лития, и ниобия, то, возможно, существуют некоторые примесные комплексы, связанные с оптическим центром Er³⁺ и междоузельным Zn²⁺.

Наличие процессов переноса энергии электронного возбуждения в исследуемых соединениях требует дальнейшего изучения механизмов формирования дефектной структуры экспериментальных образцов, а также процессов прямого и обратного переноса энергии электронного возбуждения в различных спектральных диапазонах релаксационных каналов Er³⁺.

В исследуемых органических соединениях снижение люминесцентного времени жизни ионов Er³⁺ обусловлено наличием координационных соединений и обменными энергетическими процессами между оптическим центром и ионами окружения. Такое предположение можно сделать исходя из условий типичного способа возбуждения оптического центра в координационном соединении, когда излучением УФ-области спектра производят накачку на ионы координационной сферы, которые за счет переноса энергии электронного

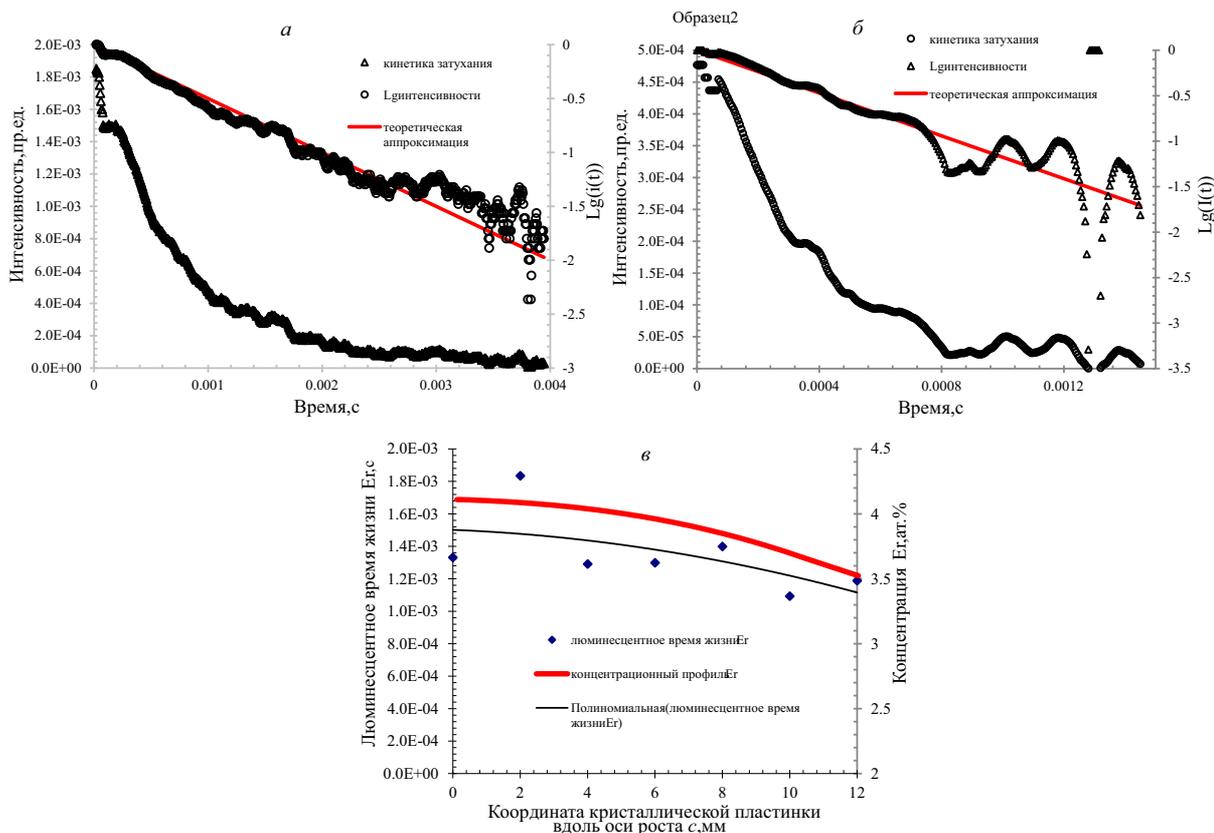


Рис. 3: Кинетики затухания люминесценции исследуемых образцов в экспоненциальном и логарифмическом масштабе: *а*) кристалла LiNbO₃:Er,Ce на длине волны 1570 нм; *б* — органического соединения № 2 (табл. II) на длине волны 1600 нм после возбуждения импульсом с длиной волны генерации 980 нм; *в* — зависимость люминесцентного времени жизни градиентно-активированного кристалла LiNbO₃:Er от концентрационного профиля оптических центров и продольной координаты кристалла

возбуждения передают энергию на оптический центр.

Результаты кинетических исследований с целью определения параметров переноса энергии электронного возбуждения и установления люминесцентного времени жизни возбужденных состояний ионов Er³⁺ в полимерных координационных соединениях демонстрируют значительное снижение люминесцентного времени жизни. В сравнении с параметрами, полученными для кристаллов LiNbO₃:Yb,Er (время жизни Er в области 1.5 мкм составляет порядка 2.7 мс), для полимерного координационного соединения с оптическими центрами Yb–Er люминесцентное время жизни возбужденного состояния снижается до уровня 358 мкс (табл. IV).

Снижение люминесцентного времени жизни оказывает влияние на такие генерационные параметры оптической среды, как сечение излучения и коэффициент усиления. На рис. 4, *а* представлено сравнение расчетных спектров сечения излучения кристаллов LiNbO₃:Er и LiNbO₃:Er,Ce с постоянной концентрацией оптических центров.

На рис. 4, *б* обозначено сравнение коэффициентов усиления кристаллов LiNbO₃:Er,Ce и LiNbO₃:Er,

Таблица IV: Люминесцентные времена жизни возбужденных состояний Er-активированных сред в области 1.5 мкм

№ п/п	Оптическая среда	Люминесцентное время жизни, τ
1	LiNbO ₃ :Er	1.05 мс
2	LiNbO ₃ :Er,Zn	690 мкс
3	LiNbO ₃ :Er,Ce,Zn	780 мкс
4	(Er+Yb)(dbm) ₂ Palm-Phen	372 мкс
5	(Er+Yb)(hfa) ₂ Palm-Phen	613 мкс
6	Er(hfa) ₂ Palm-Phen	366 мкс
7	Er(dbm) ₂ Palm-Phen	366 мкс
8	(Er+Yb) (acac) ₂ Palm-Phen	358 мкс

а также показаны расчеты коэффициента усиления градиентно-активированного кристалла LiNbO₃:Er с неравномерным распределением (концентрационный профиль) примеси Er.

Как видно из представленных результатов, сенсibilизация кристаллов ионами релаксаторами Ce³⁺ уве-

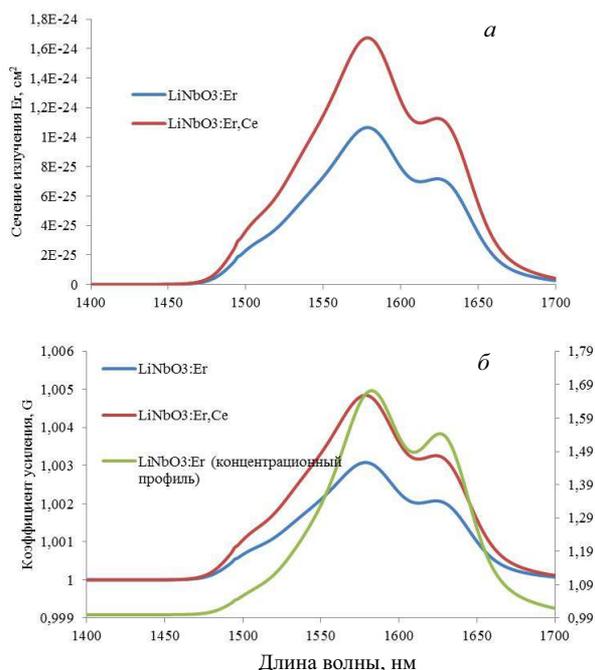


Рис. 4: Сравнение генерационных параметров активированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Ce}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ при равных начальных условиях: *а* — сечения излучений исследуемых образцов; *б* — сравнение коэффициентов усиления в исследуемых образцах

личивает сечение излучения оптического материала в области 1.5 мкм более чем на 50 % при условии одинаковых концентраций оптических центров Er^{3+} . Наличие концентрационного профиля оптического центра Er^{3+} при расчете коэффициента усиления определяет

увеличение коэффициента усиления более чем на 60 % по сравнению с расчетными значениями для однородно легированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er,Ce}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования сенсibilизированных монокристаллов с оптическими центрами Er^{3+} и примесными центрами Zn^{2+} и Ce^{3+} показали, что образцы демонстрируют снижение люминесцентного времени жизни оптических центров в области 1.5 мкм по сравнению с однородно легированными кристаллами $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$. Сенсibilизация кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce,Zn})$ приводит к возрастанию сечения излучения в области 1.5 мкм исследуемых образцов на величину порядка 50 %. Аналогичная ситуация наблюдается для градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$, где коэффициент усиления возрастает на более чем 50 % по отношению к однородно легированным кристаллам.

На образцах полимерных органических координационных соединений, легированных ионами Er^{3+} , Er^{3+} и Yb^{3+} , обнаружено излучение в области 1.5 мкм при возбуждении в область 980 нм. Время жизни возбужденного состояния $^4\text{I}_{13/2}$ ионов Er^{3+} по отношению к кристаллическим соединениям снижено до 350–400 мкс. Данный результат может быть объяснен процессами безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения между комплексами внутри полимерной матрицы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 8.4958.2017/БЧ (17/28-т).

- [1] Крупенин В. Л. Кристаллы ниобата лития — обеспечение телекоммуникаций Современные наукоемкие технологии [Электронный ресурс]. <https://www.top-technologies.ru/ruarticle/view?id=25309>.
- [2] Кузьминов Ю. С. Ниобат и танталат лития — материалы для нелинейной оптики. Наука. М., 1975.
- [3] Сидоров Н. В. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. М.: Наука, 2003.
- [4] Палатников М. Н. Неорганические материалы. 2013. **49**, № 8. С. 880.
- [5] Tsai C. B., Hsia Y. T., Shih M. D. Journal of Crystal Growth. 2005. **275**. P. 504.
- [6] Gektin A., Goriletskiy V., Zaslavskiy B. Crystal Growth Technology. From Fundamentals and Simulation to Large-scale Production. H. J. Scheel, P. Capper (Eds.). Wiley, Weinheim, 2008. P. 353.
- [7] Способ получения монокристаллов : пат. № 2293146 РФ. МПК(7) С30В 15/20, С30В 15/12 [Текст] / Лебедев В. А. ; опубл. бюл. № 4, 2007.
- [8] Okhrimchuk A. G. Optical Materials. 2015. **43**. P. 1.
- [9] Романов А. Н. Химическая физика. 2017. **36**, № 1. С. 27.
- [10] Sgibnev Y. M., Nikonorov N. V., Ignatiev A. I. Journal of Luminescence. 2016. **176**. P. 292.
- [11] Klyukin D. A. Optical Engineering. 2016. **55**, N 6. P. 067101.
- [12] Obratsov P. A. Laser Physics. 2016. **26**, N 8. P. 084008.
- [13] OXIDE: [сайт]. <http://www.opt-oxide.com/en/singlecrystals/s-products/sln/>.
- [14] CASTECH: [сайт]. http://www.castech.com/products_detail/productId=108.html.
- [15] Gooch & Housego. Enabling Photonic Technologies: [сайт]. <https://goochandhousego.com/product-categories/ln-wafers/>.
- [16] Altechna: [сайт]. URL: http://www.altechna.com/product_details.php?id=259&product_name=LiNbO3.
- [17] EKSMa OPTICS: [сайт]. <http://eksmaoptics.com/nonlinear-and-laser-crystals/nonlinear-crystals/lithium-niobate-linbo3-crystals/#attributes>.
- [18] Калинин В. Т., Сидоров Н. В., Палатников М. Н.

- Апатиты: КНЦ РАН, 2005.
- [19] Палатников М. Н. ФТТ. 2015. **57**, Вып. 8. С. 1515.
- [20] Galutskiy V. V., Stroganova E. V., Vatlina M. I. Journal of Crystal Growth. 2009. **311**. P. 1190.
- [21] Stroganova E. V., Galutskiy V. V., Yakovenko N. A. Optics and Spectroscopy. Condensed Matter Spectroscopy. 2011. **110**, N 3. P. 401.
- [22] Stroganova E. V., Galutskiy V. V., Yakovenko N. A. Advanced Materials Research. 2013. **660**. P. 40.
- [23] Stroganova E. V. Optics and Spectroscopy. 2016. **121**, N 6. P. 856.
- [24] Мешкова С. Б., Кирияк А. В., Гусев А. Н., Ницименко Г. А., Шульгин В. Ф. Журнал прикладной спектроскопии. 2012. **79**, № 5. С. 721.
- [25] Gusev A. N., Shul'gin V. F., Meshkova S. B., Hasegawa M., Alexandrov G. G., Eremanko I. L., Linert W. Polyhedron. 2012. **47**, № 1. С. 37.
- [26] Шульгин В. Ф., Абхаирова С. В., Конник О. В., Мешкова С. Б., Топилова З. М., Кискин М. А., Еременко И. Л. Журнал неорганической химии. 2012. **57**, № 3. С. 476.
- [27] Jackson S. D., King T. A., Pollnau M. Optics Letters. 1999. **24**. P. 1133.
- [28] Fukuda T., Rudolph P., Uda S. М.: Физматлит, 2009.
- [29] Поздняков Е. И. Письма о материалах. 2013. **3**. С. 264.
- [30] Стrogанова Е. В. Автометрия. 2016. **52**. № 2. С. 73.

Study of luminescent-kinetic properties of various optical devices materials doped with rare earth elements Yb and Er

A. A. Grinev¹, Y. M. Lukyanchenko¹, A. A. Schema¹, V. V. Galutskiy¹, E. V. Stroganova^{1,a}, V. F. Shulgin^{2,b}, A. N. Gusev²

¹Kuban State University. Krasnodar 350040, Russia

²V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Simferopol, Republic of Crimea, 295007, Russia
E-mail: ^astroganova@phys.kubsu.ru, ^bta.cfu@mail.ru

Experimental analysis of single top production includes set of problems. In this paper we review the measuring of multijet events and the efficiency of using triggers.

PACS: 78.15.+e, 61.66.-f.

Keywords: gradient-activated crystals, organic coordination compounds, optical centers, luminescent lifetime.

Received 15 May 2018.

Сведения об авторах

1. Гринёв Александр Александрович — магистрант.
 2. Лукьянченко Ярослав Михайлович — магистрант.
 3. Цема Александр Алексеевич — аспирант.
 4. Галуцкий Валерий Викторович — канд. физ.-мат. наук, доцент.
 5. Стrogанова Елена Валерьевна — доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; e-mail: stroganova@phys.kubsu.ru.
 6. Шульгин Виктор Федорович — доктор хим. наук, профессор; e-mail: ta.cfu@mail.ru.
 7. Гусев Алексей Николаевич — доктор хим. наук, доцент.
-