

УДК 535 : 543.42, 538.958, 535 : 530.182

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАДИЕНТНО АКТИВИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ LiNbO_3 С КОНЦЕНТРАЦИОННЫМИ ПРОФИЛЯМИ ИОНОВ Yb^{3+} И Er^{3+} *

Е. В. Строганова, В. В. Галуцкий, Н. Н. Налбантов, А. С. Козин

*Кубанский государственный университет,
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149
E-mail: stroganova@phys.kubsu.ru*

Исследованы люминесцентные свойства градиентно активированных кристаллов ниобата лития с концентрационными профилями оптических центров ионов иттербия и эрбия. Показано, что спектрально-люминесцентные свойства градиентных кристаллов коррелируются с концентрационными профилями оптических центров доноров Yb^{3+} и акцепторов Er^{3+} .

Ключевые слова: градиентно активированные кристаллы, концентрационные профили оптических центров, спектрально-люминесцентные свойства.

DOI: 10.15372/AUT20170111

Введение. Кристаллы ниобата лития обладают изоморфной структурой [1], что обуславливает их использование в качестве материала для создания различных фотонных устройств и эффективных лазерных элементов с неравномерным распределением оптических примесей [2, 3]. Кристаллы LiNbO_3 , легированные ионами Er^{3+} , представляют потенциальный интерес в области разработки многоканальных лазерных систем на базе одного кристалла.

Основной задачей данного исследования является изучение квантовой эффективности люминесценции различных спектральных диапазонов в градиентно активированных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Yb}$, Er как возможности создания многоканального оптического устройства.

Эксперимент. На рис. 1, *a, b* представлены концентрационные профили оптических центров Yb и Er в градиентно активированных кристаллах LiNbO_3 , полученных в Кубанском государственном университете (фотографии кристаллов приведены на вставках) [4], а также прослежена корреляция процессов поглощения и излучения ионов Er^{3+} в различных спектральных диапазонах.

На рис. 2 показаны характерные спектры люминесценции ионов эрбия после накачки излучением полупроводникового лазерного диода LDD-10 с длиной волны генерации 980 нм (производство фирмы "ATC-Semiconductor Devices"), измеренные в различных координатах исследуемого кристаллического образца.

Как видно, интенсивность излучения процесса ап-конверсии Er^{3+} в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Yb}$, Er и $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ увеличивается с ростом концентрации оптических центров.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1291) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-42-230214 (16/110)).

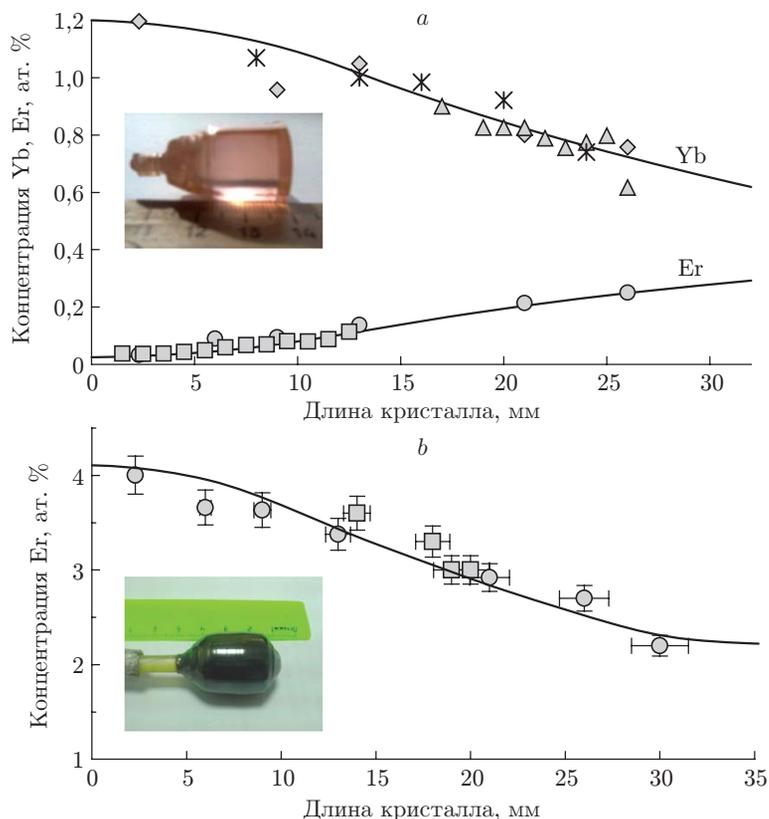


Рис. 1. Корреляция концентрационных профилей оптических центров с их спектрально-люминесцентными свойствами: *a* — концентрационные профили оптических центров Yb^{3+} и Er^{3+} в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Yb, Er}$; *b* — концентрационный профиль оптического центра Er^{3+} в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$. Интегральные интенсивности в процессах поглощения и излучения Yb^{3+} и Er^{3+} : \circ — поглощение Er , \diamond — поглощение Yb , \triangle — излучение Er на длине волны 1,5 мкм, \square — излучение апконверсии Er , $*$ — излучение Er в области 3 мкм

Однако процессы изменения интегральной интенсивности излучения в области 1,5 мкм в исследуемых кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Yb, Er}$ неэквивалентны друг другу. В кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ интегральная интенсивность излучения полностью коррелирует с концентрационным профилем оптических центров (увеличивается с ростом концентрации Er^{3+}). В кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Yb, Er}$ наблюдается совершенно другая картина: с ростом концентрации ионов Er^{3+} интегральная интенсивность излучения уменьшается и коррелирует с функцией изменения концентрационного профиля ионов-доноров Yb^{3+} . На рис. 1 в виде маркеров представлены зависимости процессов поглощения и излучения оптических центров от концентрационных профилей оптических центров в кристаллах. Такой же характер носит изменение интегральной интенсивности излучения Er в области 2,6–3 мкм в соответствии с концентрационным профилем ионов-доноров Yb^{3+} .

Корреляцию интегрального излучения в областях 1,5 и 3 мкм ионов Er^{3+} с концентрационными профилями оптических центров можно объяснить с позиции донорно-акцепторного взаимодействия $\text{Yb}-\text{Er}$ прямого и обратного процессов безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения. На рис. 3, *a* показаны кинетики люминесценции $\text{LiNbO}_3:\text{Yb, Er}$, измеренные после импульса основной гармоники $\text{YAG}:\text{Nd}$ -лазера на длине волны 1620 нм в различных координатах кристалла. Неэкспоненциальный вид кривых

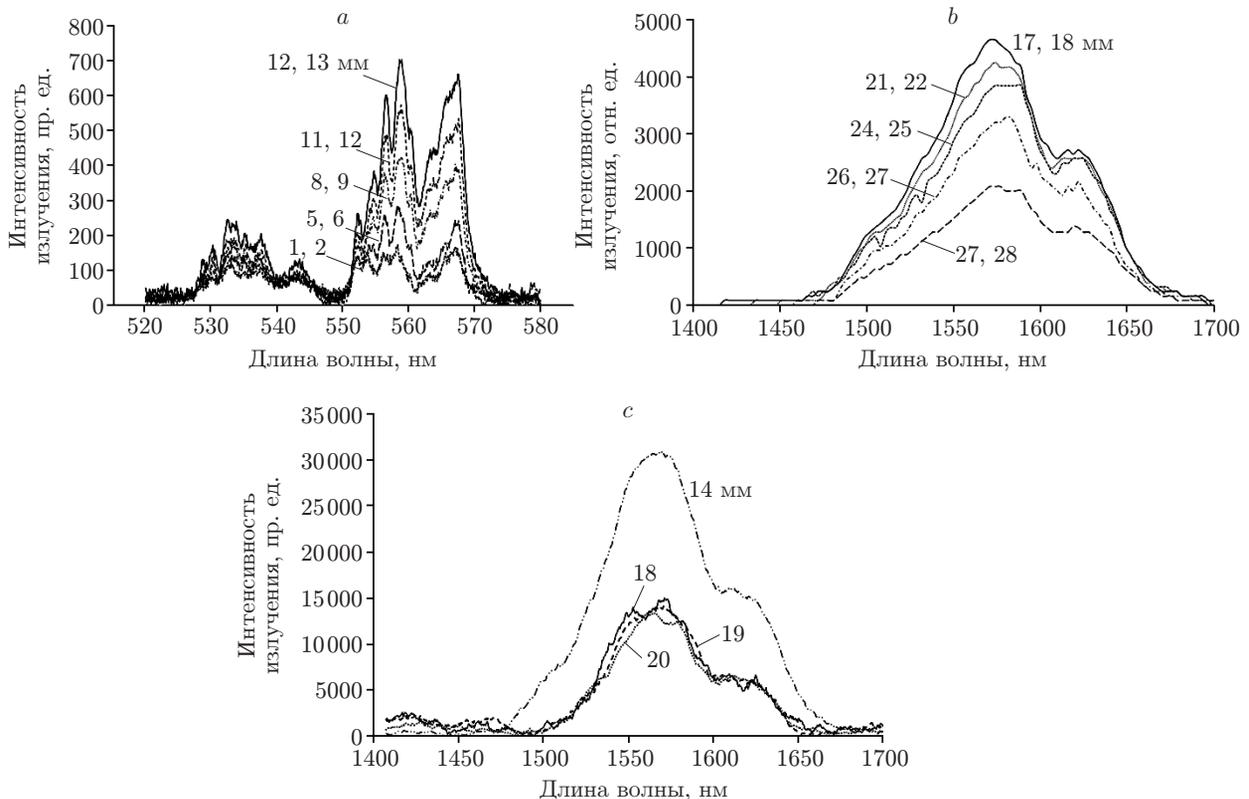


Рис. 2. Изменения спектров излучения ионов эрбия различных спектральных диапазонов в зависимости от координат кристаллов: *a* — интенсивности ап-конверсии Er в спектральной области 520–580 нм кристаллов LiNbO₃:Er, LiNbO₃:Yb, Er; *b* — интенсивности Er в области 1400–1700 нм в кристалле LiNbO₃:Yb, Er; *c* — интенсивности Er в области 1400–1700 нм в кристалле LiNbO₃:Er

кинетик подтверждает наличие прямого и обратного процесса переноса энергии электронного возбуждения между донорами Yb³⁺ и акцепторами Er³⁺.

На рис. 3, *b* представлено сравнение кинетик населённостей энергетических состояний ионов эрбия в градиентно активированных кристаллах LiNbO₃:Yb, Er и LiNbO₃:Er, а именно мультиплетов ⁴I_{13/2} (кривые 1 и 2) и ⁴I_{11/2} (кривые 3 и 4) (все кривые даны в логарифмическом масштабе), участвующих в процессах люминесценции на длинах волн 1,5 и 3 мкм соответственно. Расчёты проводились согласно модели дифференциальных кинетических уравнений [5], в качестве накачки рассматривалось излучение диодного лазера с длиной волны генерации 980 нм и величиной поглощённой мощности 20 мВт. В кристаллах, сенсibilизированных ионами иттербия, наблюдается значительный прирост населённостей обоих энергетических состояний (до 72 % для мультиплета ⁴I_{13/2}, до 368 % для ⁴I_{11/2}). Кривые 3 и 4 иллюстрируют более медленный темп распада состояния ⁴I_{11/2} в кристаллах, что связано с задержкой, которую вносят конкурирующие процессы прямого и обратного безызлучательного переноса энергии между ионами иттербия и эрбия. Спектрально-люминесцентные исследования (см. рис. 1, 2) подтверждают наличие сильного донорно-акцепторного взаимодействия между оптическими центрами, а также его влияние на процесс обеднения лазерного и предлазерного энергетических состояний (1,5 и 3 мкм) ионов Er.

Согласно той же модели кинетических уравнений [5] были произведены вычисления квантовой эффективности люминесценции ионов эрбия на длине волны 3 мкм в кристалле

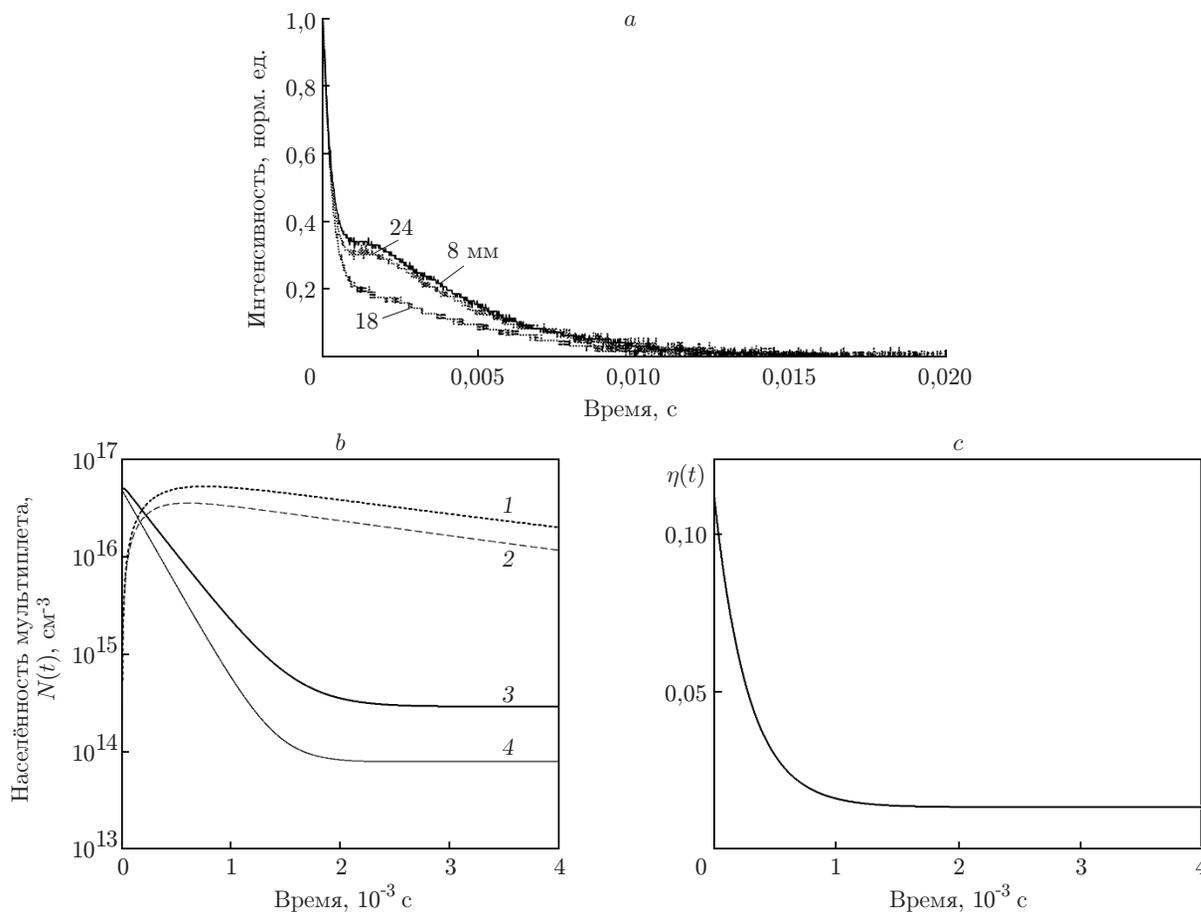


Рис. 3. Процессы обеднения населённостей энергетических состояний ионов Er в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Yb, Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$: *a* — кинетика затухания люминесценции кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Yb, Er}$, измеренная после возбуждения импульсом основной гармоники YAG:Nd-лазера на длине волны 1620 нм; *b* — кинетика населённостей энергетических состояний в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Yb, Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ (кривые 1, 2 — $^4\text{I}_{13/2}$, кривые 3, 4 — $^4\text{I}_{11/2}$); *c* — квантовая эффективность люминесценции на длине волны 3 мкм в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$

$\text{LiNbO}_3:\text{Er}$. Аналитическое выражение имеет следующий вид:

$$\eta(t) = \frac{A_{11/2}N_{11/2}(t)}{\sigma_{abs}\varphi(t)N_{15/2}(t) + A_{3/2}N_{3/2}(t) + (A_{9/2} + W_{9/2})N_{9/2}(t)}, \quad (1)$$

где A_i — постоянная времени излучательного распада i -го энергетического состояния (с^{-1}); W_i — постоянная времени безызлучательного перехода i -го энергетического состояния в j -е состояние (с^{-1}); σ_{abs} — сечение поглощения ионов эрбия на длине волны накачки; $N_i(t)$ — концентрация ионов в i -м энергетическом состоянии (см^{-3}); $\varphi(t)$ — форма временного профиля накачки в единицах плотности потока фотонов ($\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$); $i = 3/2, 9/2, 11/2, 15/2$ — мультиплеты $^4\text{S}_{3/2}, ^4\text{I}_{9/2}, ^4\text{I}_{11/2}, ^4\text{I}_{15/2}$ ионов эрбия соответственно.

Результат моделирования по формуле (1) приведён на рис. 3, *c*. Радиационный распад не является основным каналом дезактивации энергетического состояния $^4\text{I}_{11/2}$. Уступая процессам безызлучательного распада, ап-конверсии и кроссрелаксации, квантовая эффективность люминесценции составляет величину 1,31 %.

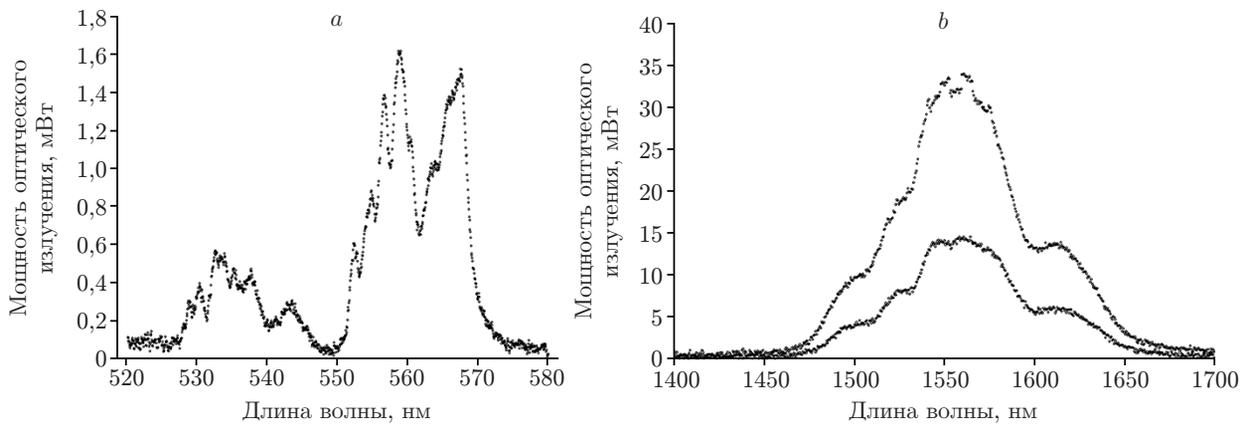


Рис. 4. Количественная оценка мощности оптического излучения кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Yb, Er}$ в различных спектральных диапазонах: *a* — мощность излучения процесса ап-конверсии; *b* — мощность излучения в области 1,5 мкм, измеренная при разных уровнях накачки исследуемого образца

Для количественной оценки возможности создания многоканальной излучательной системы экспериментально исследована эффективность излучения ап-конверсии ионов Er^{3+} в спектральной области 520–580 нм и в области 1,5 мкм. Для решения задачи использовались измерители мощности THOR LABS S370C и THOR LABS S314C с чувствительностью 3,87 и 0,9396 мВ/Вт соответственно. На рис. 4, *a* представлен спектр интенсивности оптического излучения процесса ап-конверсии, которое по эффективности составляет $\sim 10\%$ от поглощённой энергии лазерного диода (с длиной волны генерации 980 нм) кристаллом $\text{LiNbO}_3:\text{Yb, Er}$. Теоретические исследования результатов оценки квантовой эффективности процесса ап-конверсии для спектральной линии 520–580 нм соответствуют экспериментальным данным $\sim 12\%$. На рис. 4, *b* показаны спектры интенсивности оптического излучения ионов Er в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Yb, Er}$ при различных уровнях мощности накачки оптического излучения. По предварительным оценкам эффективность 1,5 мкм излучения в исследуемом образце составляет $\sim 20\%$. Однако для уточнения количественного значения квантовой эффективности 1,5 мкм излучения необходимо провести дополнительные исследования эффективности 3 мкм излучения, а также определить параметры обратного переноса энергии электронного возбуждения в системе Yb—Er градиентно активированных кристаллов LiNbO_3 .

Закключение. В результате исследования установлено, что интегральная интенсивность поглощения и излучения ионов Er^{3+} различных спектральных диапазонов в градиентно активированных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ полностью коррелирует с концентрационным профилем оптических центров. В кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Yb, Er}$ корреляция интегральной интенсивности с концентрационными профилями оптических центров выполняется только в процессах поглощения ионов Yb^{3+} и Er^{3+} и излучения ап-конверсии Er^{3+} . Интегральная интенсивность излучения в областях 1,5 и 3 мкм ионов Er^{3+} коррелирует с концентрационным профилем ионов-доноров Yb^{3+} . Это объясняется наличием в системе Yb—Er процессов прямого и обратного переноса энергии электронного возбуждения между примесными оптическими центрами. Теоретически и экспериментально исследованы оценки квантовой эффективности ап-конверсии в спектральной области 520–580 нм ионов Er^{3+} в диапазоне 10–12%. Экспериментальная оценка излучения в области 1,5 мкм составляет порядка 20%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Строганова Е. В., Галуцкий В. В., Судариков К. В. и др.** Определение центрального состава градиентно активированных кристаллов ниобата лития с примесью магния и хрома // Автометрия. 2016. **52**, № 2. С. 73–80.
2. **Строганова Е. В., Галуцкий В. В., Ткачев Д. С. и др.** Увеличение эффективности накачки при использовании градиентно сенсibilизированных лазерных кристаллов // Оптика и спектроскопия. 2014. **117**, № 6. С. 1012–1017.
3. **Галуцкий В. В., Строганова Е. В., Шмаргилов С. А., Яковенко Н. А.** Особенности преобразования частоты в градиентных кристаллах PPLN // Квантовая электроника. 2014. **44**, № 1. С. 30–33.
4. **Galutskiy V. V., Vatlina M. I., Stroganov E. V.** Growth of single crystal with a gradient of concentration of impurities by the Czochralski method using additional liquid charging // Journ. Crystal Growth. 2009. **311**, Is. 4. P. 1190–1194.
5. **Cantelar E., Cussó F.** Competitive up-conversion mechanisms in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped LiNbO_3 // Journ. Luminescence. 2003. **102–103**. P. 525–531.

Поступила в редакцию 8 июня 2016 г.
