

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**НЕВСКАЯ ФОТОНИКА-2023**  
**ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**  
**С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ**  
**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

9-13 октября 2023 г.

**ИТМО**



**НЕВСКАЯ  
ФОТОНИКА**

Санкт-Петербург  
2023

УДК 53.04, 53.08, 53.09, 61, 531.7, 535, 537.87, 538.95, 616, 620.3, 681.7  
ББК 22.34, 28.70, 32.86, 34.58, 53.4

Невская фотоника-2023, Всероссийская научная конференция с международным участием, сборник научных трудов (9-13 октября 2023 г.) / под ред. д.ф.-м.н. Цыпкина А.Н. – СПб.: Университет ИТМО, 2023. – 315 с.

Издание содержит материалы лекций заслуженных ученых и результаты научных работ молодых ученых, доложенные на Всероссийской научной конференции с международным участием "Невская фотоника-2023", проходившей с 9 по 13 октября 2023 г., по тематикам: индустриальная фотоника, оптические материалы фотоники, сверхбыстрая фотоника и когерентная оптика, физика наноструктур, лазерная и силовая оптика, оптическая метрология, биофотоника, квантовая оптика и коммуникации, артфотоника.

ISBN 978-5-7577-0698-6



Университет ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, ведущий вуз России в области информационных, фотонных и биохимических технологий. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию: ICPC (единственный в мире семикратный чемпион), Google Code Jam, Facebook Hacker Cup, Яндекс.Алгоритм, Russian Code Cup, Topcoder Open и др. Приоритетные направления: ИТ и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication. Входит в ТОП-100 по направлению «Автоматизация и управление» Шанхайского предметного рейтинга (ARWU) и занимает 74 место в мире в британском предметном рейтинге QS по компьютерным наукам (Computer Science and Information Systems). Представлен в мировом ТОП-200 по телекоммуникационным технологиям (Telecommunication engineering), а также в ТОП-300 по нанонаукам и нанотехнологиям (Nanoscience & Nanotechnology) ARWU. Входит в ТОП-200 по инженерным наукам (Engineering and Technology), в ТОП-300 по физике и астрономии (Physics & Astronomy), наукам о материалах (Materials Sciences), а также по машиностроению, аэрокосмической и промышленной инженерии (Mechanical, Aeronautical & Manufacturing Engineering) рейтинга QS. Лидер проекта «Приоритет - 2030».

© Университет ИТМО, 2023

© Авторы, 2023

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СЕНСОРОВ Nd<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>:YF<sub>3</sub> ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

### Пудовкин М.С., Олейникова Е.И.

Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, Россия

Наночастицы Nd<sup>3+</sup>,Yb<sup>3+</sup>:YF<sub>3</sub> продемонстрировали высокую температурную чувствительность в широком диапазоне температур. Механизм температурной чувствительности включает в себя процессы фононной передачи энергии между легирующими ионами и искажение решетки из-за явления теплового расширения.

Ключевые слова: зависимость параметров кристаллической решетки от температуры, температурная чувствительность, Nd<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>:YF<sub>3</sub>.

В современном мире существует потребность в бесконтактных способах измерения температуры с высоким пространственным разрешением для гипертермии и сенсорики миоустройств. Метод люминесцентной термометрии, основанный на наночастицах, легированных Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>, является очень перспективным. Целью данной работы является спектрально-кинетическая характеризация наночастиц Nd<sup>3+</sup> (0.1 и 0.5 мол.%), Yb<sup>3+</sup> (0, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 и 3.0 мол.%):YF<sub>3</sub> для вывода о механизме температурной чувствительности.

По литературным данным системы Nd<sup>3+</sup>,Yb<sup>3+</sup>:YF<sub>3</sub> демонстрируют три зависящих от температуры процесса переноса энергии: фононный перенос энергии от Nd<sup>3+</sup> к Yb<sup>3+</sup>, обратный перенос от Yb<sup>3+</sup> к Nd<sup>3+</sup> и диффузия энергии между Yb<sup>3+</sup>. Мы вводим LIR (Luminescent Intensity Ratio) в качестве параметра, зависящего от температуры (Рис. 1 и 2). Рисунок 1 полностью согласуется с процессами передачи энергии, описанными ранее. При низких температурах вероятность рождения фононов мала, следовательно, передача на Yb<sup>3+</sup> минимальна. Для данной серии образцов максимальной температурной чувствительностью обладает образец с 0.5 мол.% Yb<sup>3+</sup> (0,0012 K<sup>-1</sup> при 310 K). Неожиданный характер температурной зависимости LIR на рисунке 2 от 80-220 K можно объяснить следующим образом. Была предположена гипотеза, что увеличение LIR с ростом температуры связано со сжатием кристаллической решетки образца при низких температурах (как следствие, уменьшаются расстояния между ионами активаторами), вследствие чего увеличивается вероятность взаимодействия ионов активаторов [1, 2]. Известно, что взаимодействие между Nd<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup> диполь-дипольное, а оно зависит от расстояния r<sup>6</sup>. Для данной серии образцов максимальной температурной чувствительностью обладает образец с 0.1 мол.% Yb<sup>3+</sup> (0,002 K<sup>-1</sup> при 100 K).

Исследование выполнено за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности. Проект FZSM-2022-0021.

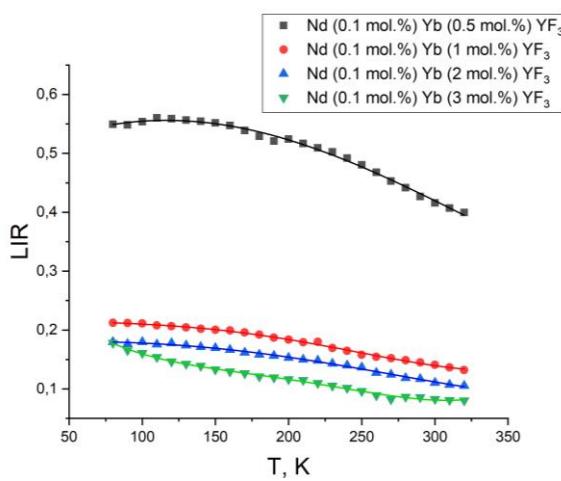


Рис. 1. LIR образцов Nd<sup>3+</sup>(0,1 мол.%), Yb<sup>3+</sup>(0,5 мол.%):YF<sub>3</sub> (черный), Nd<sup>3+</sup>(0,1 мол.%), Yb<sup>3+</sup>(1 мол.%):YF<sub>3</sub> (красный), Nd<sup>3+</sup>(0,1 мол.%), Yb<sup>3+</sup>(2 мол.%):YF<sub>3</sub> (синий) и Nd<sup>3+</sup>(0,1 мол.%), Yb<sup>3+</sup>(3 мол.%):YF<sub>3</sub> (зеленый), аппроксимированный полиномом 4 порядка

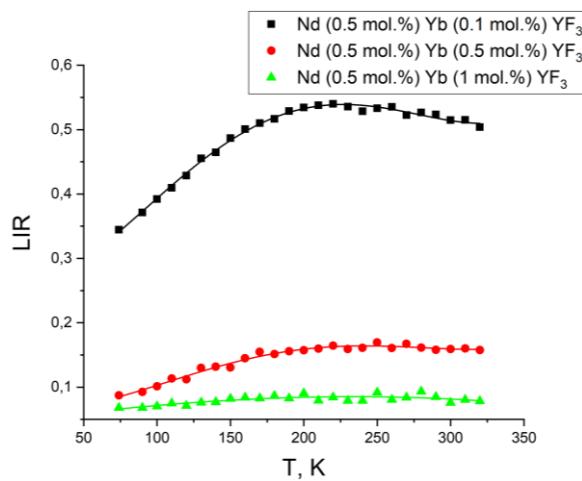


Рис. 2. LIR образцов Nd<sup>3+</sup>(0,5 мол.%), Yb<sup>3+</sup>(0,1 мол.%):YF<sub>3</sub> (черный), Nd<sup>3+</sup>(0,5 мол.%), Yb<sup>3+</sup>(0,5 мол.%):YF<sub>3</sub> (красный) и Nd<sup>3+</sup>(0,5 мол.%), Yb<sup>3+</sup>(1 мол.%):YF<sub>3</sub> (зеленый), аппроксимированный полиномом 4 порядка

- [1] Pudovkin, M., Oleynikova, E., Kiamov A. et al., *Materials*, **16**(1), 39, (2022).  
[2] Ginkel A., Pudovkin M., Oleynikova E. et al., *Photonics*, **10**(4), 375, (2023).

**СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ЛЮМИНОФОРОВ  
LiY<sub>x</sub>Gd<sub>1-x</sub>F<sub>4</sub> И LiGdF<sub>4</sub>: Eu<sup>3+</sup> ДЛЯ ЦЕЛЕЙ  
КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И СЕНСОРИКИ**

**Олейникова Е.И., Пудовкин М.С., Морозов О.А., Кораблева С.А.**

Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, Россия

В данной работе впервые определен коэффициент распределения ионов Gd<sup>3+</sup> в матрице LiYF<sub>4</sub> ( $k=0,84$ ), проведена спектрально-кинетическая характеристика образцов LiGd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>F<sub>4</sub> ( $x=0,05; 0,3$  и  $0,7$ ) и LiGdF<sub>4</sub>: Eu<sup>3+</sup>.

Ключевые слова: LiGdF<sub>4</sub>: Eu<sup>3+</sup>, люминесцентная термометрия, коэффициент распределения иона.

Кристалл LiGdF<sub>4</sub> является новым сложносинтезируемым соединением, который представляет собой актуальный материал в квантовой электронике [1], сенсорике [2] и фотовольтаике [3].

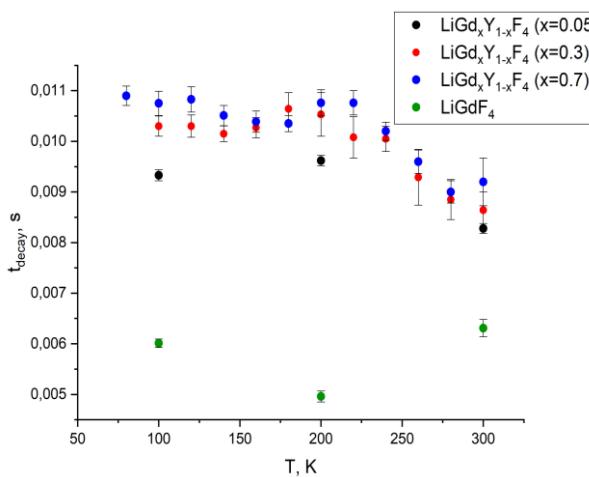
К целям и задачам данной работы можно отнести спектрально-кинетическую характеристику кристаллических частиц LiY<sub>1-x</sub>Gd<sub>x</sub>F<sub>4</sub> ( $X = 0.05, 0.3, 0.7$  и  $1.0$ ) и LiGdF<sub>4</sub>: Eu<sup>3+</sup> (1 ат.%) в зависимости от температуры.

Впервые определен коэффициент распределения ионов Gd<sup>3+</sup> в матрице LiYF<sub>4</sub>, который составляет  $k=0,84$ . Времена затухания люминесценции в диапазоне 100 – 300 K ведут себя сложным образом (рис. 1), что, по-видимому, является следствием наложения процессов многофонной безызлучательной релаксации и пленения излучения. Для образцов LiGd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>F<sub>4</sub> ( $x=0,05; 0,3$  и  $0,7$ ) время затухания люминесценции укорачивается с увеличением температуры, особенно явно это становится заметно с 200-220 K и происходит из-за доминирующего процесса многофонной релаксации на дефектах. Однако для образца LiGdF<sub>4</sub> наблюдается обратная тенденция увеличение времени затухания люминесценции с ростом температуры из-за возрастания вклада процесса пленения излучения, начиная с 200 K.

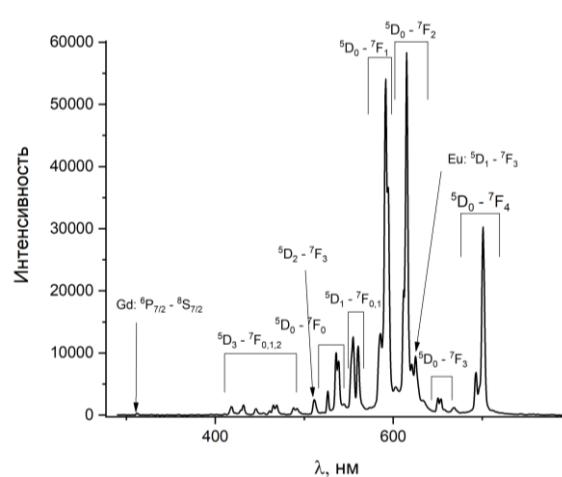
При резонансном возбуждении ионов Gd<sup>3+</sup> в LiGdF<sub>4</sub>: Eu<sup>3+</sup> (1 ат.%) наблюдается интенсивный спектр люминесценции Eu<sup>3+</sup> и практически не наблюдается спектр Gd<sup>3+</sup>, что говорит об эффективной передаче энергии Gd<sup>3+</sup> к Eu<sup>3+</sup> (рис. 2). Данное наблюдение было проверено с помощью образца LiYF<sub>4</sub>: Eu<sup>3+</sup> (3 ат.%), который при таком же возбуждении не демонстрировал люминесценцию Eu<sup>3+</sup>. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности исследуемых материалов в квантовой электронике, сенсорике и фотовольтаике.

Более того в данных образцов встречается еще два интересных с точки зрения температурной сенсорики процесса: интенсивное широкополосное излучение при низких температурах и процесс кросс-релаксации ионов Eu<sup>3+</sup>, которые также заметно зависят от температуры.

Исследование выполнено за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности. Проект FZSM-2022-0021.



**Рис. 1.** Время затухания люминесценции ( $t_{decay}$ ) образцов LiGd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>F<sub>4</sub> ( $x=0,05; 0,3; 0,7$  и  $1,0$ ) на длине волны 312 nm ( $^6P_{7/2}-^8S_{7/2}$ ) в диапазоне 100- 300 K



**Рис. 2.** Спектр люминесценции образца LiGdF<sub>4</sub>: Eu<sup>3+</sup> (1 ат.%) при комнатной температуре

[1] Morozov O.A., Korableva S.L., Nurtdinova L.A. et al., *Optical Materials*, **137**, 113490, (2023).

[2] Aigouy L., Tessier G., Mortier M. et al., *Applied Physics Letters*, **87**(18), 184105, (2005).

[3] Sheoran S., *Progress in Natural Science: Materials International*, **29**(4), 457-465, (2019).

**ОПТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ  
МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ Nd<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub>**  
**Докудовская А.К., Пудовкин М.С., Олейникова Е.И.,  
Кораблева С.Л., Морозов О.А.**

Казанский федеральный университет, Институт физики, Казань, Россия

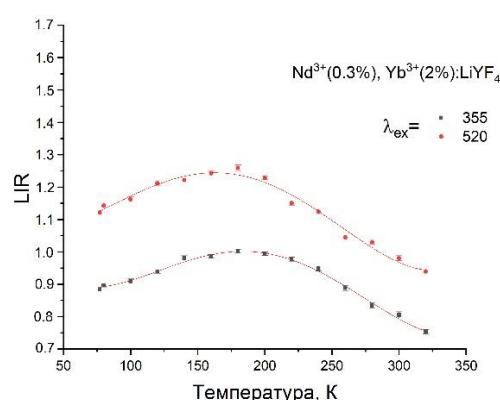
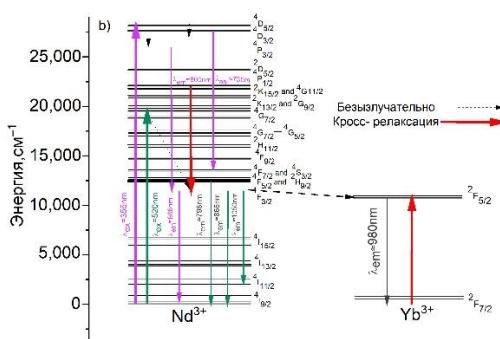
Люминофоры Nd<sup>3+</sup> (0,3 мол.%), Yb<sup>3+</sup> (0- 5 мол.%):LiYF<sub>4</sub> выращены методом Бриджмена-Стокбаргера. В качестве температурно-зависимого параметра был выбран параметр LIR. Исследовано влияние кросс-релаксации на температурную чувствительность. Получены рекордные значения S<sub>a</sub> и S<sub>r</sub>.

Ключевые слова: люминесцентная термометрия, даун- конверсия, кросс- релаксация.

**Введение.** Перспективными люминофорами для создания температурных сенсоров считаются кристаллические частицы, активированные ионной парой Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>. Целью данной работы было исследование влияния условий возбуждения на температурную чувствительность спектрально-кинетических характеристик люминофоров Nd<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub>.

**Материалы и методы.** Образцы Nd<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>: LiYF<sub>4</sub> были выращены методом Бриджмена-Стокбаргера в резистивной печи. Образцы измельчали в агатовой ступке. Измерения люминесценции проводились на лазерной установке JV LOTIS TII на длине волны 355 и 520 нм в диапазоне температур 80–320 К.

**Результаты и обсуждение.** Наиболее перспективной ионной парой для целей температурной сенсорики являются Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>[1]. Возбуждение системы осуществляется при  $\lambda_{ex} = 520$  и 355 нм в диапазоне температур 80–320 К. Все полосы интерпретированы как результат переходов с  $^4F_{3/2}$  (Nd<sup>3+</sup>) и  $^2F_{5/2}$  (Yb<sup>3+</sup>) на нижние энергетические уровни. В качестве параметра зависящий от температуры был взят параметр LIR в виде интегрального отношения полос люминесценции Nd<sup>3+</sup> ( $^4F_{3/2}$ ) к Yb<sup>3+</sup> ( $^2F_{5/2}$ ). При возбуждении на  $\lambda_{ex} = 520$  нм ( $^4I_{9/2}-^2K_{13/2}/^2G_{9/2}$  полоса поглощения Nd<sup>3+</sup>) заселение уровня Nd<sup>3+</sup> ( $^4F_{3/2}$  состояния) происходит за счет безызлучательных переходов с верхних энергетических уровней (рис. 1). Однако при возбуждении на  $\lambda_{ex} = 355$  нм ( $^4I_{9/2}-^4D_{5/2}$  полоса поглощения Nd<sup>3+</sup>) заселение уровня  $^4F_{3/2}$  (Nd<sup>3+</sup>) происходит за счет излучательных и безызлучательных процессов с верхних уровней, и за счет еще одного дополнительного процесса кросс-релаксации. Таким образом, за счет исследования параметра LIR мы хотели оценить вклад процесса кросс-релаксации на температурную чувствительность. Исходя из рис. 2, видно, что форма функции LIR слабо зависит от длины волны возбуждения, следовательно, процесс кросс-релаксации незначительно влияют на температурную чувствительность. Также были получены кинетики затухания люминесценции для Nd<sup>3+</sup> ( $^4F_{3/2}-^4I_{9/2}$ ) в зависимости от температуры, исходя из анализа, время нарастания люминесценции слабо зависит от температуры, что дополнительно свидетельствует о малом влиянии процесса кросс-релаксации на температурную чувствительность. Максимальные значения абсолютной (S<sub>a</sub>) и относительной (S<sub>r</sub>) температурных чувствительностей достигаются для Nd<sup>3+</sup> (0,3%), Yb<sup>3+</sup> (1,0%): LiYF<sub>4</sub> (S<sub>a</sub> = 0,007 K<sup>-1</sup> при 320 К) и для Nd<sup>3+</sup> (0,3%), Yb<sup>3+</sup> (5,0%):LiYF<sub>4</sub> (S<sub>r</sub> = 1,03%\*K<sup>-1</sup> при 260 К), соответственно.



**Рис. 2.** Функции LIR при различных длинах волн возбуждения  $\lambda_{ex} = 520$  нм и  $\lambda_{ex} = 355$  нм

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-00129.

[1]. Pudovkin M.S., Ginkel A.K., Lukinova E.V., *Optical Materials*, **119**, 111328, (2021).