

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: IT 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^{3+} , $\text{Yb}^{3+}:\text{YF}_3$ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Пудовкин М.С., Олейникова Е.И.

Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, Россия

Наночастицы $\text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YF}_3$ 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^{3+} , $\text{Yb}^{3+}:\text{YF}_3$.

В современном мире существует потребность в бесконтактных способах измерения температуры с высоким пространственным разрешением для гипертермии и сенсорики мироустройств. Метод люминесцентной термометрии, основанный на наночастицах, легированных $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$, является очень перспективным. Целью данной работы является спектрально-кинетическая характеристика наночастиц Nd^{3+} (0.1 и 0.5 мол.%), Yb^{3+} (0, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 и 3.0 мол.%): YF_3 для вывода о механизме температурной чувствительности.

По литературным данным системы $\text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YF}_3$ демонстрируют три зависящих от температуры процесса переноса энергии: фононный перенос энергии от Nd^{3+} к Yb^{3+} , обратный перенос от Yb^{3+} к Nd^{3+} и диффузия энергии между Yb^{3+} . 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^{3+} минимальна. Для данной серии образцов максимальной температурной чувствительностью обладает образец с 0.5 мол.% Yb^{3+} ($0,0012 \text{ K}^{-1}$ 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^{3+} и Yb^{3+} диполь-дипольное, а оно зависит от расстояния r^{-6} . Для данной серии образцов максимальной температурной чувствительностью обладает образец с 0.1 мол.% Yb^{3+} ($0,002 \text{ K}^{-1}$ 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.

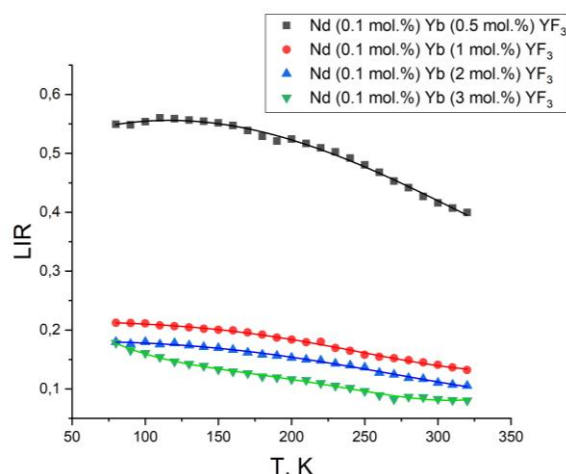


Рис. 1. LIR образцов Nd^{3+} (0,1 мол.%), Yb^{3+} (0,5 мол.%): YF_3 (черный), Nd^{3+} (0,1 мол.%), Yb^{3+} (1 мол.%): YF_3 (красный), Nd^{3+} (0,1 мол.%), Yb^{3+} (2 мол.%): YF_3 (синий) и Nd^{3+} (0,1 мол.%), Yb^{3+} (2 мол.%): YF_3 (зеленый), аппроксимированный полиномом 4 порядка

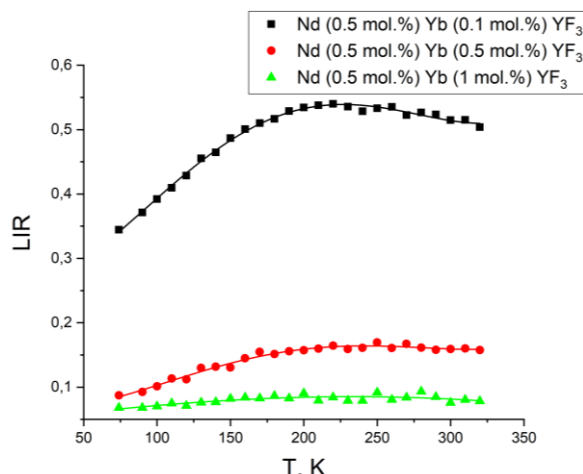


Рис. 2. LIR образцов Nd^{3+} (0,5 мол.%), Yb^{3+} (0,1 мол.%): YF_3 (черный), Nd^{3+} (0,5 мол.%), Yb^{3+} (0,5 мол.%): YF_3 (красный) и Nd^{3+} (0,5 мол.%), Yb^{3+} (1 мол.%): YF_3 (зеленый), аппроксимированный полиномом 4 порядка

[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_xGd_{1-x}F₄ И LiGdF₄: Eu³⁺ 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 Gd³⁺ в матрице LiYF₄ (k=0,84), проведена спектрально-кинетическая характеристика образцов LiGd_xY_{1-x}F₄ (x=0,05; 0,3 и 0,7) и LiGdF₄: Eu³⁺.

Ключевые слова: LiGdF₄: Eu³⁺, люминесцентная термометрия, коэффициент распределения иона.

Кристалл LiGdF₄ 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_{1-x}Gd_xF₄ (X = 0.05, 0.3, 0.7 и 1.0) и LiGdF₄: Eu³⁺ (1 ат.%) в зависимости от температуры.

Впервые определен коэффициент распределения ионов Gd³⁺ в матрице LiYF₄, который составляет k=0,84. Времена затухания люминесценции в диапазоне 100 – 300 К ведут себя сложным образом (рис. 1), что, по-видимому, является следствием наложения процессов многофононной безызлучательной релаксации и пленения излучения. Для образцов LiGd_xY_{1-x}F₄ (x=0,05; 0,3 и 0,7) время затухания люминесценции укорачивается с увеличением температуры, особенно явно это становится заметно с 200-220 К и происходит из-за доминирующего процесса многофононной релаксации на дефектах. Однако для образца LiGdF₄ наблюдается обратная тенденция увеличение времени затухания люминесценции с ростом температуры из-за возрастания вклада процесса пленения излучения, начиная с 200 К.

При резонансном возбуждении ионов Gd³⁺ в LiGdF₄: Eu³⁺ (1 ат.%) наблюдается интенсивный спектр люминесценции Eu³⁺ и практически не наблюдается спектр Gd³⁺, что говорит об эффективной передаче энергии Gd³⁺ к Eu³⁺ (рис. 2). Данное наблюдение было проверено с помощью образца LiYF₄: Eu³⁺ (3 ат.%), который при таком же возбуждении не демонстрировал люминесценцию Eu³⁺. 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 Eu³⁺, 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.

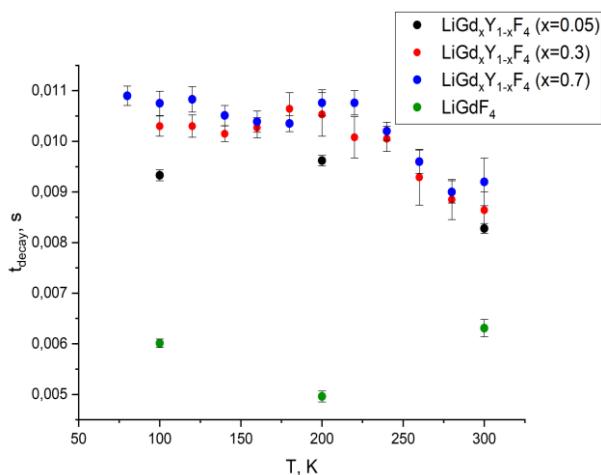


Рис. 1. Время затухания люминесценции (t_{decay}) образцов LiGd_xY_{1-x}F₄ (x=0,05; 0,3; 0,7 и 1,0) на длине волны 312 нм (⁶P_{7/2}-⁸S_{7/2}) в диапазоне 100- 300 К

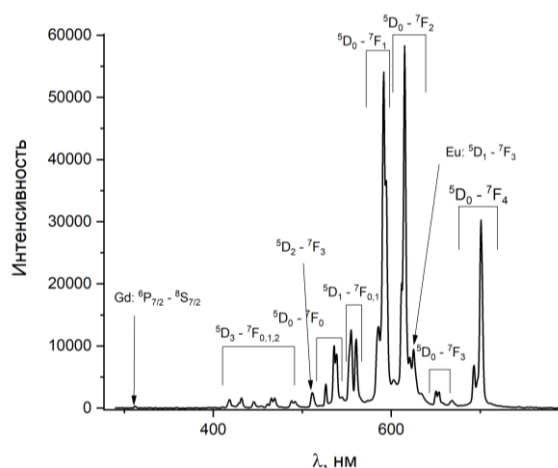


Рис. 2. Спектр люминесценции образца LiGdF₄: Eu³⁺ (1 ат.%) при комнатной температуре

- [1] Morozov O.A., Korableva S.L., Nurtudinova 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).

МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ Nd^{3+} , $\text{Yb}^{3+}:\text{LiYF}_4$

Докудовская А.К., Пудовкин М.С., Олейникова Е.И.,

Кораблева С.Л., Морозов О.А.

Казанский федеральный университет, Институт физики, Казань, Россия

Люминофоры Nd^{3+} (0,3 мол. %), Yb^{3+} (0- 5 мол. %): LiYF_4 выращены методом Бриджмена-Стокбаргера. В качестве температурно-зависимого параметра был выбран параметр LIR. Исследовано влияние кросс-релаксации на температурную чувствительность. Получены рекордные значения S_a и S_r .

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

Введение. Перспективными люминофорами для создания температурных сенсоров считаются кристаллические частицы, активированные ионной парой $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$. Целью данной работы было исследование влияния условий возбуждения на температурную чувствительность спектрально-кинетических характеристик люминофоров Nd^{3+} , Yb^{3+} : LiYF_4 .

Материалы и методы. Образцы Nd^{3+} , Yb^{3+} : LiYF_4 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 обсуждения. Наиболее перспективной ионной парой для целей температурной сенсорики являются $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ [1]. Возбуждение системы осуществляется при $\lambda_{\text{ex}} = 520$ и 355 нм в диапазоне температур $80\text{--}320$ К. Все полосы интерпретированы как результат переходов с ${}^4\text{F}_{3/2}(\text{Nd}^{3+})$ и ${}^2\text{F}_{5/2}(\text{Yb}^{3+})$ на нижние энергетические уровни. В качестве параметра зависящий от температуры был взят параметр LIR в виде интегрального отношения полос люминесценции $\text{Nd}^{3+} ({}^4\text{F}_{3/2})$ к $\text{Yb}^{3+} ({}^2\text{F}_{5/2})$. При возбуждении на $\lambda_{\text{ex}} = 520$ нм (${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^2\text{K}_{13/2}/{}^2\text{G}_{9/2}$ полоса поглощения Nd^{3+}) заселение уровня $\text{Nd}^{3+} ({}^4\text{F}_{3/2})$ происходит за счет безызлучательных переходов с верхних энергетических уровней (рис. 1). Однако при возбуждении на $\lambda_{\text{ex}} = 355$ нм (${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{D}_{5/2}$ полоса поглощения Nd^{3+}) заселение уровня ${}^4\text{F}_{3/2}(\text{Nd}^{3+})$ 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 зависят от длины волны возбуждения, следовательно, процесс кросс- релаксации незначительно влияют на температурную чувствительность. Также были получены кинетики затухания люминесценции для $\text{Nd}^{3+} ({}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2})$ в зависимости от температуры, исходя из анализа, время нарастания люминесценции слабо зависят от температуры, что дополнительно свидетельствует о малом влиянии процесса кросс- релаксации на температурную чувствительность. Максимальные значения абсолютной (S_a) и относительной (S_r) температурных чувствительностей достигаются для Nd^{3+} (0,3%), Yb^{3+} (1,0%): LiYF_4 ($S_a = 0,007 \text{ K}^{-1}$ при 320 K) и для Nd^{3+} (0,3%), Yb^{3+} (5,0%): LiYF_4 ($S_r = 1,03\% \cdot \text{K}^{-1}$ при 260 K), соответственно.

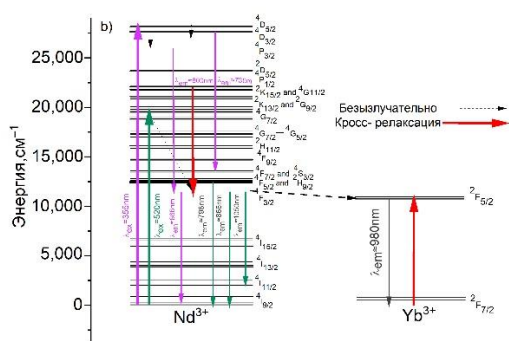


Рис. 1. Схематическая диаграмма энергетических уровней Nd^{3+} и Yb^{3+}

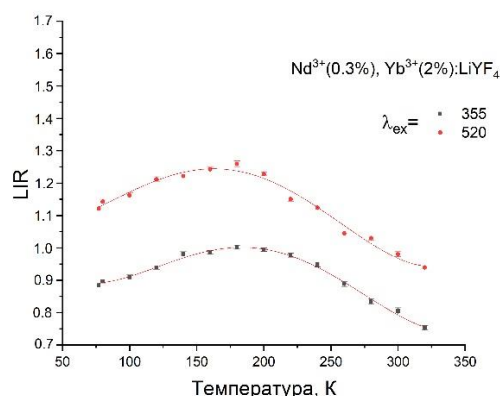


Рис. 2. Функции LIR при различных длинах волн возбуждения $\lambda_{ex} = 520$ нм и $\lambda_{ex} = 355$ нм

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).