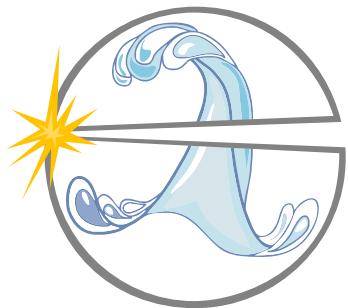


# ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ



## ЕНИСЕЙСКАЯ ФОТОНИКА — 2024

**ТЕЗИСЫ  
ДОКЛАДОВ**

**ТОМ 1**

Красноярск  
16–20 сентября 2024 года

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Сибирский федеральный университет  
Институт инженерной физики и радиоэлектроники

Национальный исследовательский университет ИТМО  
Научно-образовательный центр фотоники и оптоинформатики

Российская академия наук  
Сибирское отделение  
Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр»  
Институт физики им. Л. В. Киренского

## **ЕНИСЕЙСКАЯ ФОТОНИКА – 2024**

Всероссийская научная конференция  
с международным участием

тезисы докладов

16 – 20 сентября 2024 г.

Красноярск  
2024

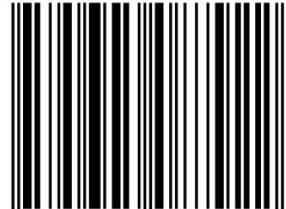
УДК 535  
ББК 22.34  
Е 63

**Енисейская Фотоника – 2024. Всероссийская научная конференция с международным участием. Тезисы докладов.** 16–20 сентября 2024 года, Красноярск. Т. 1. – Изд-во ИФ СО РАН, 2024. – 299 с.

В сборнике представлены тезисы докладов всероссийской научной конференции с международным участием «Енисейская Фотоника – 2024» проходившей в г. Красноярске с 16 по 20 сентября 2024 г. Сборник предназначен для научных сотрудников, аспирантов, преподавателей и студентов, интересующихся проблемами фотоники, оптики и спектроскопии. Печатаются по решению Программного комитета конференции в авторской редакции.

ISBN 978-5-6050879-2-2

ISBN 978-5-6050879-2-2



9 785605 087922 >

© Коллектив авторов, 2024  
© Сибирский федеральный университет, 2024  
© Университет ИТМО, 2024  
© Институт физики им. Л. В. Киренского, 2024

## **ОПТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ ЧАСТИЦ CeO<sub>2</sub> И CeO<sub>2</sub>/CeF<sub>3</sub>, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Er<sup>3+</sup> И Nd<sup>3+</sup>/ Yb<sup>3+</sup>**

А. К. Докудовская<sup>1\*</sup>, Р. М. Раҳматуллин<sup>1</sup>, О. А. Морозов<sup>1,2</sup>, С. Л. Кораблева<sup>1</sup>,  
Е. И. Олейникова<sup>1</sup>, В. В. Семашко<sup>1,2</sup>, М. С. Пудовкин<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет  
420008, Российская Федерация, Казань, ул. Кремлевская, д. 18  
\*E-mail: fyz0561999@gmail.com

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. Завойского, ФИЦ Казанский научный центр РАН  
420029, Российская Федерация, Казань, Сибирский тракт, д. 10/7

Здесь сообщается о легком сухом синтезе композитных наночастиц CeO<sub>2</sub>/CeF<sub>3</sub>, легированных ионами Er<sup>3+</sup> и Nd<sup>3+</sup>/ Yb<sup>3+</sup>, с использованием бифторида аммония (NH<sub>4</sub>HF<sub>2</sub>) и отжига на воздухе, соответственно. Данные методы позволяют синтезировать композитные наночастицы с различным соотношением CeO<sub>2</sub> и CeF<sub>3</sub>. Что касается структуры CeO<sub>2</sub>/CeF<sub>3</sub>: Er<sup>3+</sup> (0,1 ат. %), интенсивность люминесценции ионов Ce<sup>3+</sup> и Er<sup>3+</sup> увеличивается в 3,5 раза после процедуры фторирования, что говорит об увеличении концентрации Ce<sup>3+</sup> и Er<sup>3+</sup> с последующей эффективной передачи энергии ионам Er<sup>3+</sup>. В случае наночастиц CeF<sub>3</sub>/CeO<sub>2</sub>: Nd<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> имеет место противоположная процедура синтеза. При резонансном возбуждении ионов Nd<sup>3+</sup> у композитов CeF<sub>3</sub>/CeO<sub>2</sub>: Nd<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> наблюдается эмиссия как Nd<sup>3+</sup>, так и Yb<sup>3+</sup>. В то время как в однофазных частицах CeO<sub>2</sub>: Nd<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> преимущественно наблюдается эмиссия Yb<sup>3+</sup>.

Наночастицы на основе редкоземельных элементов (НЧ) являются перспективными наноматериалами для применения в различных областях, таких как катализ, медицина, оптоэлектроника, биоизображение [1, 2] и измерение температуры [3]. Имеются многочисленные публикации о применении обоих типов НЧ церия для катализа и медицинских целей. НЧ диоксида церия (или церия - CeO<sub>2</sub>) широко изучались благодаря его замечательным свойствам, таким как способность аккумулировать кислород, а также способности сохранять структуру типа флюорита при высокой концентрации кислородных вакансий. Эти свойства связаны с легким переходом между степенями окисления 4+ и 3+ в церии. Присутствие ионов Ce<sup>4+</sup> и Ce<sup>3+</sup> обеспечивает окислительно-восстановительную активность на поверхности НЧ CeO<sub>2</sub> и оказывает выдающееся антиоксидантное действие. Это позволяет НЧ CeO<sub>2</sub> действовать как противовоспалительные агенты, что делает их потенциально инновационными терапевтическими инструментами. Выдающиеся свойства НЧ CeO<sub>2</sub> и CeF<sub>3</sub> можно объединить путем синтеза композитных НЧ CeO<sub>2</sub>/CeF<sub>3</sub>. В свою очередь, процедура допирования может увеличить область применения данных соединений. Например, его можно использовать для измерения температуры, фотодинамической терапии, индуцированной рентгеновскими лучами, катализа, повышающего и понижающего преобразования и в других областях.

Целью моей работы было изучение влияния двухфазного состава CeO<sub>2</sub>/CeF<sub>3</sub> на люминесцентные свойства редкоземельных элементов Er<sup>3+</sup> и пары Nd<sup>3+</sup>/ Yb<sup>3+</sup>.

A. CeO<sub>2</sub>/CeF<sub>3</sub>: Er<sup>3+</sup> (0,1 ат. %).

Двухфазные наночастицы CeO<sub>2</sub>/CeF<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup> (0,1 ат. %) были получены при отжиге в атмосфере бифторида аммония (NH<sub>4</sub>HF<sub>2</sub>) при 300 °C 2 часа наночастиц CeO<sub>2</sub>:Er<sup>3+</sup> (0,1 ат. %). Церий имеет две степени окисления 3+ и 4+, а относительная концентрация зависит от окислительно-восстановительных условий процесса пробоподготовки. При возбуждении Ce<sup>3+</sup> на длине волны 355 нм в 5d состояние отчетливо виден широкий пик эмиссии Ce<sup>3+</sup> с центром ~440 нм. Также происходит передача энергии от Ce<sup>3+</sup> к Er<sup>3+</sup> через возбужденное состояние <sup>4</sup>F<sub>5/2</sub> Er<sup>3+</sup>. Кроме того, происходят безызлучательные переходы из возбужденного состояния Er<sup>3+</sup> <sup>4</sup>F<sub>5/2</sub> в низшие состояния <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub> и <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>. В частности, суммарная интенсивность люминесценции 4f-4f переходов Er<sup>3+</sup> наночастиц CeO<sub>2</sub>/CeF<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup> (0,1 ат. %) в 3,5 раза выше по сравнению с CeO<sub>2</sub>:Er<sup>3+</sup> (0,1 ат. %) как при УФ, так и при резонансном возбуждении (рис. 1 (а)). Вероятно, это может быть связано с повышенной концентрацией трехвалентных редкоземельных ионов в кубически-искаженной среде и наблюдаемые явления требуют дальнейшего изучения.

### Б. $\text{CeF}_3/\text{CeO}_2$ : $\text{Nd}^{3+}$ (0,1 ат. %), $\text{Yb}^{3+}$ (0,5 ат. %).

В случае наночастиц  $\text{CeF}_3/\text{CeO}_2:\text{Nd}^{3+}$  (0,1 ат. %),  $\text{Yb}^{3+}$  (0,5 ат. %) имеет место противоположная процедура синтеза, отжиг образцов  $\text{CeF}_3:\text{Nd}^{3+}$  (0,1 ат. %),  $\text{Yb}^{3+}$  (0,5 ат. %) происходит на воздухе при  $1000^{\circ}\text{C}$  при различных временах 15, 30, 60 и 90 минут. Здесь у частиц  $\text{CeF}_3:\text{Nd}^{3+}$  (0,1 ат. %),  $\text{Yb}^{3+}$  (0,5 ат. %) при резонансном возбуждении  $\text{Nd}^{3+}$  (в состояние  ${}^2\text{H}_{9/2}-{}^4\text{F}_{5/2}$ ,  $\lambda_{\text{ex}}=790$  нм) эмиссия  $\text{Yb}^{3+}$  почти не наблюдается. Однако после отжига на воздухе и формирования двухфазных образцов  $\text{CeF}_3/\text{CeO}_2:\text{Nd}^{3+}$  (0,1 ат. %),  $\text{Yb}^{3+}$  (0,5 ат. %) наблюдаются эмиссии как  $\text{Nd}^{3+}$ , так и  $\text{Yb}^{3+}$  (рис.1 (б)). В однофазных наночастицах  $\text{CeO}_2:\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  при тех же условиях возбуждения наблюдается только эмиссия  $\text{Yb}^{3+}$ , люминесценция  $\text{Nd}^{3+}$  почти не заметна. Это явление может быть связано с несколькими факторами, включая трансформацию фононного спектра и изменение параметров кристаллической решетки, влияющие на расстояние между донором ( $\text{Nd}^{3+}$ ) и акцептором ( $\text{Yb}^{3+}$ ). Температурно-зависимая спектральная характеристика  $\text{CeF}_3/\text{CeO}_2$ :  $\text{Nd}^{3+}$  (0,1 ат. %),  $\text{Yb}^{3+}$  (0,5 ат. %) показала, что их можно использовать в дистанционном люминесцентном измерении температуры.

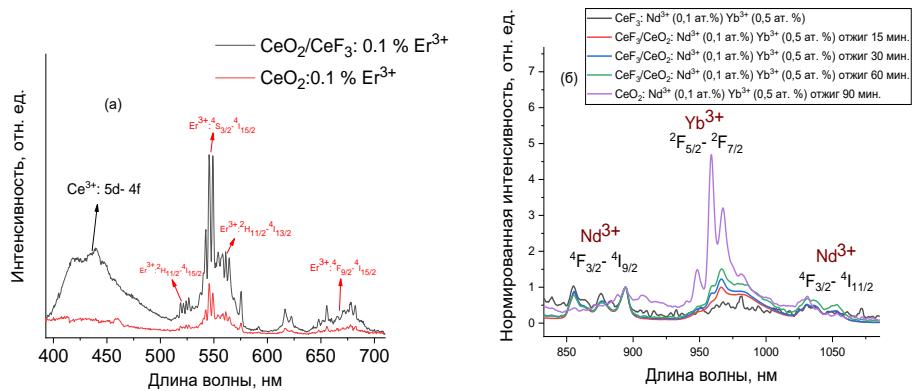


Рис.1. (а) Спектры люминесценции образцов  $\text{CeO}_2/\text{CeF}_3:\text{Er}^{3+}$  (0,1 ат. %) и  $\text{CeO}_2:\text{Er}^{3+}$  (0,1 ат. %), полученные при комнатной температуре  $\lambda_{\text{ex}}=355$  нм в полосу поглощения  $\text{Ce}^{3+} 5d$  состояния, (б) спектры люминесценции образцов  $\text{CeF}_3/\text{CeO}_2:\text{Nd}^{3+}$  (0,1 ат. %),  $\text{Yb}^{3+}$  (0,5 ат. %) при различных временах отжига на воздухе при  $1000^{\circ}\text{C}$ , полученные при комнатной температуре  $\lambda_{\text{ex}}=790$  нм в полосу поглощения  $\text{Nd}^{3+} {}^2\text{H}_{9/2}-{}^4\text{F}_{5/2}$  состояний.

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

### Список литературы

- Chen C., Li C., Shi Z. Current advances in lanthanide-doped upconversion nanostructures for detection and bioapplication //Advanced Science. – 2016. – Т. 3. – №. 10. – С. 1600029.
- Walkey C. et al. Catalytic properties and biomedical applications of cerium oxide nanoparticles //Environmental Science: Nano. – 2015. – Т. 2. – №. 1. – С. 33-53.
- Ginkel A. et al. Optical Temperature Sensors Based on Down-Conversion  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ :  $\text{LiYF}_4$  Microparticles //Photonics. – MDPI, 2023. – Т. 10. – №. 4. – С. 375.

# ТЕМПЕРАТУРНАЯ СЕНСОРИКА НА ОСНОВЕ НАНО- И МИКРОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ ФТОРИДОВ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ $\text{Eu}^{3+}$ : ПРОЦЕССЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ, РОЛЬ ДЕФЕКТОВ

Е. И. Олейникова<sup>1\*</sup>, М. С. Пудовкин<sup>1</sup>, О. А. Морозов<sup>1</sup>, С. Л. Кораблева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет  
420008, Российская Федерация, Казань, ул. Кремлёвская, д. 18  
\*E-mail: Kate15-05@mail.ru

В данной работе впервые определен коэффициент распределения ионов  $\text{Gd}^{3+}$  в матрице  $\text{LiYF}_4$  ( $k=0,84$ ), проведена спектрально-кинетическая характеризация образцов  $\text{LiGd}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$  ( $x=0,05; 0,3$  и  $0,7$ ) и  $\text{LiGdF}_4$ :  $\text{Eu}^{3+}$ . Было обнаружено интенсивное свечение центров окраски при низких температурах, на зависимости интенсивностей свечения центров окраски и ионов  $\text{Eu}^{3+}$  получены высокие значения температурной чувствительности ( $S_a=0.36\text{K}^{-1}$  (100 K) и  $S_a=0.035\text{K}^{-1}$  (310 K)).

Кристалл  $\text{LiGdF}_4$  является новым сложносинтезируемым соединением, который представляет собой актуальный материал в квантовой электронике [1], сенсорике [2] и фотовольтаике [3].

К задачам и цели данной работы можно отнести характеризацию микрочастиц  $\text{LiYF}_4:\text{Gd}^{3+}$  и  $\text{LiGdF}_4$  допированного ионами  $\text{Eu}^{3+}$ , а также исследование таких параметров их люминесценции, как форма спектра люминесценции и кинетики затухания люминесценции в зависимости от температуры. Также в данной работе определен коэффициент распределения ионов  $\text{Gd}^{3+}$  в матрице  $\text{LiYF}_4$ , который равняется  $k=0,84$ .

Микрочастицы  $\text{LiYF}_4:\text{Gd}^{3+}$  были получены путем перемалывания кристаллов, синтезированных методом Бриджмана-Стокбаргера. Фазовый состав был подтвержден методом порошкового рентгенофазового анализа, люминесцентные характеристики были исследованы методом лазерной абсорбционной спектроскопии.

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  $\text{LiGd}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$  ( $x=0,05; 0,3$  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  $\text{LiGdF}_4$  наблюдается обратная тенденция увеличение времени затухания люминесценции с ростом температуры из-за возрастания вклада процесса пленения излучения, начиная с 200 K. Также мы замечаем, что время затухания люминесценции  $t_{\text{decay}}$  для образца  $\text{LiGdF}_4$  значительно ниже остальных, это связано с концентрационным тушением в образце. После проведенных экспериментов для дальнейшего исследования был выбран образец  $\text{LiGdF}_4$ , так как в нем происходит два температурно-зависимых процесса: многофонная релаксация на дефектах и пленение возбуждения, вследствие чего, мы можем получить более высокую температурную чувствительность.

На рисунке 2 видим большое количество интенсивных узких полос люминесценции  $\text{Eu}^{3+}$  и практически не видим полосы люминесценции  $\text{Gd}^{3+}$ . Данное явление мы объясняем эффективной передачей энергии от  $\text{Gd}^{3+}$  к  $\text{Eu}^{3+}$ . Данное наблюдение было проверено с помощью образца  $\text{LiYF}_4$ :  $\text{Eu}^{3+}$  (3 ат.-%), который при таком же возбуждении 274nm не демонстрировал люминесценцию  $\text{Eu}^{3+}$ . Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности исследуемых материалов в качестве покрытий для кремниевых солнечных батарей.

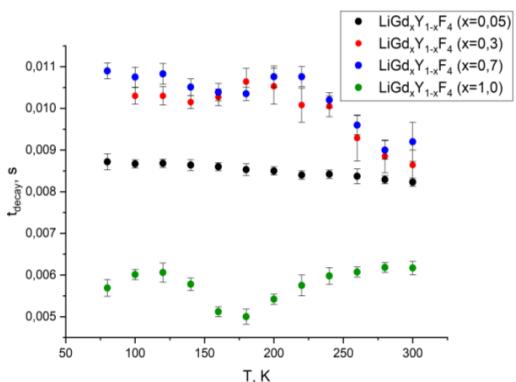


Рисунок 1. Время затухания люминесценции ( $t_{\text{decay}}$ ) образцов  $\text{LiGd}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$  ( $x=0,05; 0,3; 0,7$  и  $1,0$ ) на длине волны 312 нм ( ${}^6\text{P}_{7/2}-{}^8\text{S}_{7/2}$ ) в диапазоне температур 100–300К

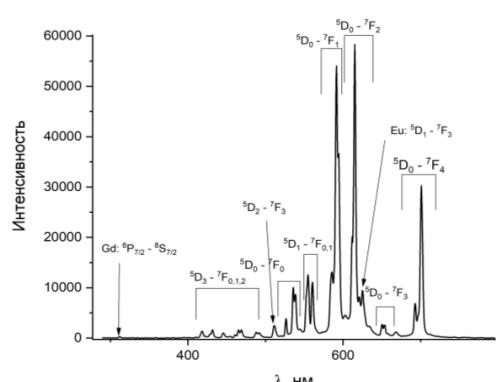


Рисунок 2. Спектр люминесценции образца  $\text{LiGdF}_4:\text{Eu}$  (1 ат.%) при комнатной температуре (возбуждение 274нм)

Также для данных образцов встречается еще один интересный с точки зрения температурной сенсорики процесс – широкополосное излучение при низких температурах (рис. 3, 4).

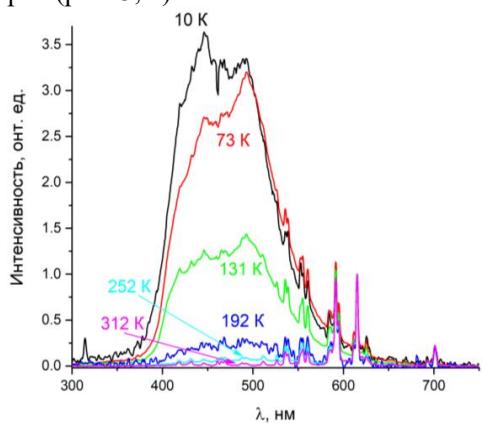
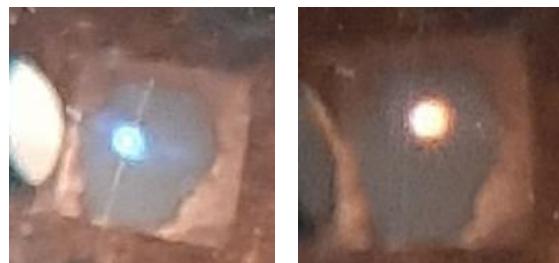


Рисунок 3. Спектр люминесценции образца  $\text{LiGdF}_4:\text{Eu}^{3+}$  (1 ат.%) в диапазоне температур 10–290К, при возбуждении 274нм ( $\text{Gd}^{3+}$ ).



а) 100 К б) 300 К

Рисунок 4. Иллюстрация цвета свечения образцов при темпераутре: а) 100 К, б) 300 К

Полученные температурные чувствительности, основанные на отношении интегральных интенсивностей люминесценции центров окраски и ионов  $\text{Eu}^{3+}$ . В образце  $\text{LiGdF}_4:\text{Eu}^{3+}$  (1 ат.%) была получена конкурентная температурная чувствительность  $S_a=0.035\text{K}^{-1}$  в диапазоне 300–320 К, и рекордная температурная чувствительность  $S_a=0.36\text{K}^{-1}$  в диапазоне 90–120 К.

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

#### Список литературы

1. O. A. Morozov, S. L. Korabileva, L.A. Nurtdinova et al. Growth and characterization of optical and thermal properties of  $\text{LiGdF}_4$  single crystal // Optical Materials, vol. 137, p. 113490, 2023.
2. L. Aigouy, G. Tessier, M. Mortier et al. Scanning thermal imaging of microelectronic circuits with a fluorescent nanoprobe // Applied Physics Letters, vol. 87(18), p. 184105, 2005.
3. S. Sheoran et al. Down-conversion characteristics of  $\text{Eu}^{3+}$  doped  $\text{M}_2\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_9$  ( $\text{M}=\text{Ba}, \text{Ca}, \text{Mg}$  and  $\text{Sr}$ ) nanomaterials for innovative solar panels // Progress in Natural Science: Materials International, vol. 29(4), pp. 457–465, 2019.