

## СИНТЕЗ АП-КОНВЕРСИОННЫХ ЛЮМИНОФОРОВ НА ОСНОВЕ ФТОРИДА СТРОНЦИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО $\text{Ho}^{3+}$ и $\text{Er}^{3+}$ , ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАТОРОВ ДВУХМИКРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2016 Ю. А. Рожнова, С. В. Кузнецов, В. В. Воронов, П. П. Федоров

*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, ул. Вавилова, 38, 119991 Москва, Россия  
e-mail: ppfedorov@yandex.ru*

Поступила в редакцию 30.08.2016

**Аннотация.** Синтезированы однофазные образцы твердого раствора  $\text{Sr}_{0.98-x}\text{Er}_{0.02}\text{Ho}_x\text{F}_{2.02+x}$  ( $x = 0.005—0.100$ ) со структурой типа флюорита. Продемонстрирована возможность ИК-визуализации лазерного излучения из области 2 мкм в красный диапазон спектра по механизму ап-конверсии.

**Ключевые слова:** неорганические фториды, твердые растворы, ап-конверсионные люминофоры, ИК-визуализаторы.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы резко возросло число публикаций в области синтеза и изучения спектрально-люминесцентных и генерационных характеристик материалов, излучающих в ИК диапазоне [1—4]. Интерес к ИК диапазону не случаен, т. к. он является перспективным для использования в медицине, биологии, астрофизике, военной технике (обнаружение, наблюдение и сопровождение целей), анализе загрязненности воздушной среды с использованием лазерной локации, создании оптоэлектронных устройств и т. д. Диапазон длин волн около 2 мкм применяется в медицинских хирургических лазерах и лидарах. Разработка аппаратуры, излучающей в ИК-диапазоне, создает дополнительные трудности при работе с такими приборами, т. к. рабочее излучение не видимо глазом. Для упрощения задач, связанных с юстировкой оптических схем, визуализации пятна лазерного излучения и регулировки его профиля применяют визуализаторы ИК-излучения, позволяющие переводить ИК-излучение в видимое по механизму ап-конверсии. Ап-конверсия — это процесс передачи энергии излучения накачки из низкоэнергетической области в более высокоэнергетическую, например, из ИК-диапазона в видимый диапазон света. Эффективность ап-конверсии является низкой. Оптимальным классом материалов для ап-конверсии, с точки зрения физико-химических свойств и протяженности фонов спектра, являются фториды редко-

земельных элементов [4, 5]. Для визуализации ИК-излучения в области 1.9—2.1 мкм перспективно использовать матрицы, легированные ионом гольмия и гольмия с эрбием [6—8].

Для получения порошков фторида стронция используют различные методы синтеза, но наиболее часто применяют гидро- [9—15] или сольвотермальный способы [16, 17]. Эти методы эффективны и позволяют контролировать морфологию и размер наночастиц фторидов путем подбора растворителей и времени проведения процесса. С другой стороны, они требуют повышенных температур и давлений, использования органических растворителей, что приводит к усложнению аппаратного оформления. С технологической точки зрения одним из наиболее простых и масштабируемых способов получения порошков фторидов является метод осаждения из водных растворов [5, 18—22].

При получении нанопорошков на основе фторида стронция, легированного редкоземельными элементами (РЗЭ), перспективно использование в качестве фторирующего агента, помимо фтороводородной кислоты, также фторида аммония. Это связано с вхождением иона аммония в состав осадка с образованием твердых растворов типа  $\text{Sr}_{1-x-y}\text{R}_x(\text{NH}_4)_y\text{F}_{2+x-y}$ , которые при нагревании разлагаются с выделением фтороводорода, предохраняя, таким образом, порошки от пиролиза [18—20]. Еще более перспективным представляется использование бифторида аммония  $\text{NH}_4\text{HF}_2$ ,

объединяющего в себе преимущества обоих фторирующих агентов.

Целью данной работы был синтез однофазных твердых растворов на основе фторида стронция, со-легированного ионами  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Ho}^{3+}$ , для ИК-визуализаторов двухмикронного излучения.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

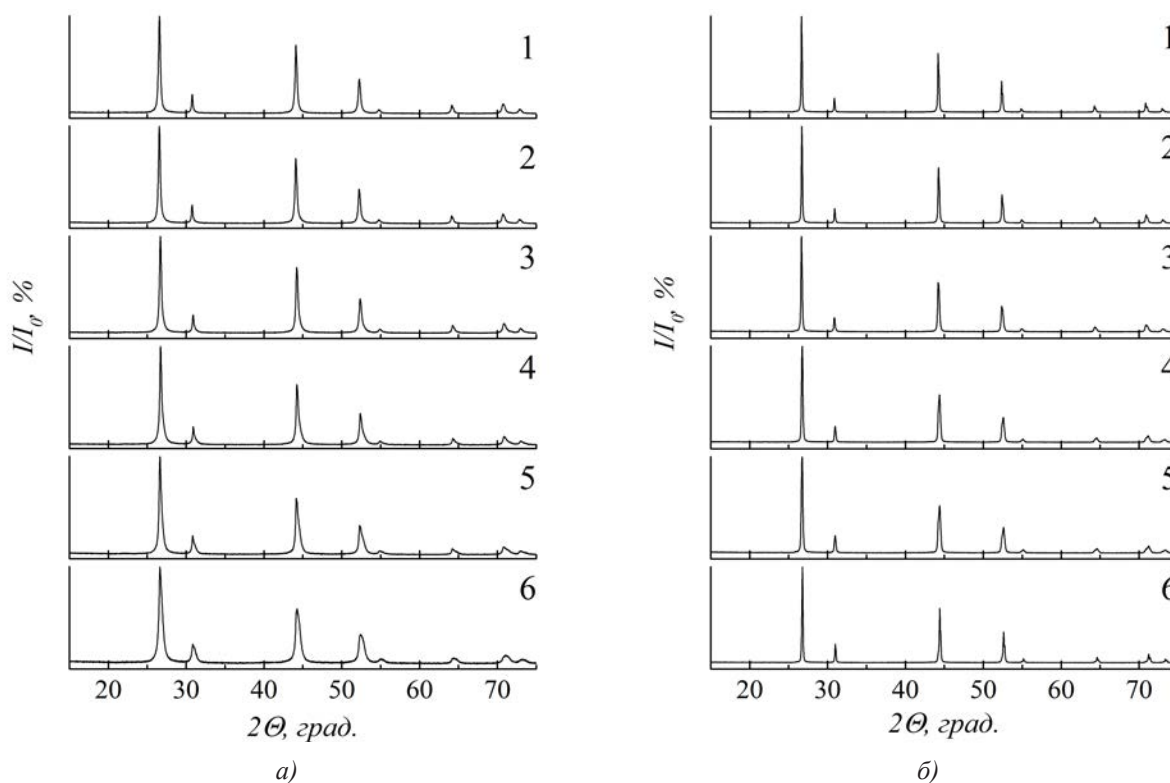
В качестве исходных веществ использовали  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  (99.99 % по металлическим примесям),  $\text{Er}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (99.99 % РЗЭ),  $\text{Ho}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (99.99 % РЗЭ), бифторид аммония (ч) и бидистиллированную воду. Основными узлами установки синтеза являются: реактор из полипропилена, магнитная мешалка, дозатор подачи исходных растворов. В первую очередь готовили растворы нитрата стронция (0.03 М) и нитратов РЗЭ (0.03 М), которые перемешивали в течение 10—15 минут с помощью магнитной мешалки. Осаждение вели путем покапельного добавления раствора нитратов в раствор бифторида аммония (0.10 М при избытке 40 % от стехиометрии). По завершении покапельного добавления полученную суспензию перемешивали в течение 2 часов. После отстаивания осадка маточный раствор декантировали, осадок

промывали разбавленным раствором бифторида аммония с контролем чистоты отмытки от  $\text{NO}_3^-$  ионов качественной реакцией с дифениламином. Отмытый осадок центрифугировали в течение 5 минут при скорости вращения 10 000 об/мин, после чего перегружали в чашку из фторопласта и высушивали на воздухе при 45 °С. Высокотемпературную сушку осадка проводили в платиновом тигле при температуре 600 °С в течение 1 часа при скорости нагрева 10 °/мин.

Рентгенофазовый анализ (РФА) синтезированных образцов проводили на дифрактометре Bruker D8 Advance ( $\text{CuK}\alpha$ -излучение). С помощью программного обеспечения TOPAS были рассчитаны параметры решетки ( $a$ ) и размеры областей когерентного рассеяния ( $D$ ). ИК-визуализацию наблюдали при помощи лазера («ИРЭ Полнос») на длине волны 2.1 мкм, работающего в непрерывном режиме с мощностью накачки 3.5 Вт.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Была проведена серия синтезов образцов нанопорошков номинального состава  $\text{Sr}_{0.98-x}\text{Er}_{0.02-x}\text{Ho}_x\text{F}_{2.02+x}$ , причем концентрация гольмия изменялась от 0.5 до 10 мол.% ( $x = 0.005—0.100$ ). На рис. 1 представ-



**Рис. 1.** Рентгенограммы синтезированных порошков номинального состава  $\text{Sr}_{0.98-x}\text{Er}_{0.02-x}\text{Ho}_x\text{F}_{2.02+x}$  после сушки при 45 °С (а) и после термообработки при 600 °С (б) при различном содержании  $\text{Ho}^{3+}$ :

1 —  $x = 0.005$  мол.д.; 2 —  $x = 0.02$  мол.д.; 3 —  $x = 0.04$  мол.д.; 4 —  $x = 0.06$  мол.д.; 5 —  $x = 0.08$  мол.д.; 6 —  $x = 0.10$  мол.д.

лены рентгенограммы синтезированных порошков после сушки при 45 °С и после термообработки при 600 °С, соответственно. Из рис. 1 видно, что все рентгенограммы являются однофазными и соответствуют гранецентрированной кубической решетке фторида стронция (карточка JCPDS № 88—2294). У образцов, высушенных при 45 °С (рис. 1а), наблюдается уширение дифракционных

пиков, которое обусловлено малыми размерами областей когерентного рассеяния (*D*), причем размеры кристаллитов уменьшаются при увеличении концентрации гольмия, что согласуется с данными табл. 1. После термообработки при 600 °С (рис. 1б) пики образцов становятся значительно уже, что говорит об увеличении размеров кристаллитов и подтверждается рентгенографически (табл. 1).

**Таблица 1.** Результаты синтеза порошков твердых растворов  $\text{Sr}_{0.98-x}\text{Er}_{0.02}\text{Ho}_x\text{F}_{2.02+x}$

№ опыта*	Номинальный состав образца	<i>a</i> , Å	$\Delta a \cdot 10^{-4}$ , Å	<i>D</i> , нм
F1247a	$\text{Sr}_{0.975}\text{Er}_{0.02}\text{Ho}_{0.005}\text{F}_{2.025}$	5.7999(2)	45	26
F1247		5.7954(3)		130
F1248a	$\text{Sr}_{0.96}\text{Er}_{0.02}\text{Ho}_{0.02}\text{F}_{2.04}$	5.7996(2)	71	26
F1248		5.7925(2)		159
F1249a	$\text{Sr}_{0.94}\text{Er}_{0.02}\text{Ho}_{0.04}\text{F}_{2.06}$	5.7981(4)	97	25
F1249		5.7884(2)		122
F1250a	$\text{Sr}_{0.92}\text{Er}_{0.02}\text{Ho}_{0.06}\text{F}_{2.08}$	5.7940(3)	121	23
F1250		5.7819(3)		155
F1251a	$\text{Sr}_{0.90}\text{Er}_{0.02}\text{Ho}_{0.08}\text{F}_{2.10}$	5.7874(3)	120	17
F1251		5.7754(2)		126
F1252a	$\text{Sr}_{0.88}\text{Er}_{0.02}\text{Ho}_{0.10}\text{F}_{2.12}$	5.7774(5)	107	14
F1252		5.7667(3)		191

\* Примечание: F12XXa — порошок, высушенный при температуре 45 °С, F12XX — порошок, термообработанный при температуре 600 °С,  $\Delta a = a(\text{F12XXa}) - a(\text{F12XX})$ .

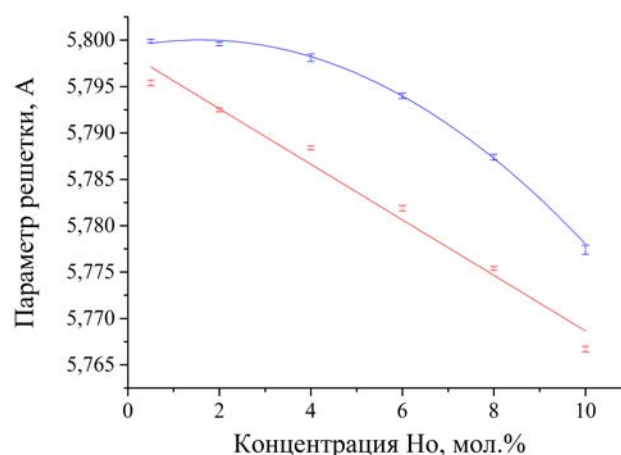
На рис. 2 приведена зависимость изменения параметра решетки синтезированных порошков в зависимости от концентрации гольмия при различных режимах термообработки. Из рисунка видно, что параметр решетки синтезированных образцов независимо от режимов термообработки уменьшается при увеличении концентрации гольмия. У образцов, высушенных при 45 °С, наблюдается полиномиальный характер зависимости:

$$a = 5.79925 + 9.8639 \cdot 10^{-4}x - 3.10677 \cdot 10^{-4}x^2, \text{ Å},$$

где  $R^2 = 0.997$ , а у образцов, термообработанных при 600 °С, наблюдается линейная зависимость:

$$a = 5.79861 - 0.00299x, \text{ Å},$$

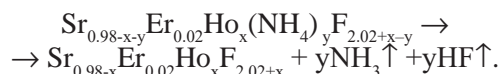
где  $R^2 = 0.974$ . Это соответствует литературным данным о концентрационной зависимости параметров решетки твердых растворов  $\text{Sr}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$  [23].



**Рис. 2.** Изменение параметра решетки синтезированных порошков  $\text{Sr}_{0.98-x}\text{Er}_{0.02}\text{Ho}_x\text{F}_{2.02+x}$  в зависимости от концентрации  $\text{Ho}^{+3}$ :

верхняя кривая — образцы, высушенные при 45 °С; нижняя группа точек — образцы, прокаленные при 600 °С

Различия в параметрах решетки может быть объяснено образованием твердого раствора  $\text{Sr}_{0.98-x-y}\text{Er}_{0.02}\text{Ho}_x(\text{NH}_4)_y\text{F}_{2.02+x-y}$  при синтезе частиц методом осаждения из водных растворов при избытке  $\text{NH}_4\text{HF}_2$  с последующим его разложением при температуре 600 °С:



Аналогичные явления наблюдались нами ранее [16—18]. Судя по величине изменения  $\Delta a$  (рис. 2) максимальная концентрация иона аммония в твердом растворе реализуется при промежуточных концентрациях РЗЭ (суммарно 8—10 мол.%).

Для демонстрации возможности использования образцов в качестве ИК-визуализаторов термообработанные при 600 °С порошки были закреплены на стеклянной подложке и подвергнуты облучению лазером (рис. 3). В результате была визуальна зарегистрирована люминесценция красного цвета, что свидетельствует о правильности выбранной методики получения порошков и возможности достижения визуализации ИК-излучения.



Рис. 3. ИК-визуализация образца  $\text{Sr}_{0.975}\text{Er}_{0.02}\text{Ho}_{0.005}\text{F}_{2.025}$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были синтезированы однофазные образцы твердого раствора флюоритовой структуры  $\text{Sr}_{0.98-x}\text{Er}_{0.02}\text{Ho}_x\text{F}_{2.02+x}$  ( $x = 0.005—0.100$ ). Впервые в качестве фторирующего агента использовали бифторид аммония. Продемонстрирована возможность ИК-визуализации лазерного излучения в области 2 мкм.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Филатову С. А. за ИК-визуализацию полученных образцов. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-11784-офи\_м.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tressaud A., Poeppelmeier K. *Photonic & Electronic Properties of Fluoride Materials*. Elsevier, 2016, Ed. 1, p. 534.
2. Kuznetsov S. V., Rozhnova Yu. A., Yasirkina D. S., Mayakova M. N., Pominova D. V., Ryabova A. V., Voronov V. V., Fedorov P. P. // «*Properties, design and applications of upconverting nanomaterials*», Conference book 1<sup>st</sup> Conference and Spring School, May 23—27, 2016, Wroclaw, pp. 94.
3. Huang X., Han S., Huang W., Liu X. // *Chem. Soc. Rev.*, 2013, vol. 42, pp. 173—201.
4. Fedorov P. P., Luginina A. A., Popov A. I. // *J. Fluor. Chem.*, 2015, vol. 172, pp. 22—50.
5. Fedorov P. P., Luginina A. A., Kuznetsov S. V., Osiko V. V. // *J. Fluor. Chem.*, 2011, vol. 132, pp. 1012—1039.
6. Ляпин А. А., Рябочкина П. А., Ушаков С. Н., Федоров П. П. // *Квантовая электроника*, 2014. т. 44, № 6, с. 602—605.
7. Ляпин А. А., Рябочкина П. А., Чабушкин А. Н., Ушаков С. Н., Федоров П. П. // *Прикладная фотоника*, 2014, № 1, с. 58—64.
8. Lyapin A. A., Ryabochkina P. A., Chabushkin A. N., Ushakov S. N., Fedorov P. P. // *J. Lumin.*, 2015, vol. 167, pp. 120—125.
9. Jin Y., Qin W., Zhang J. // *J. Fluor. Chem.*, 2008, vol. 29, pp. 515—518.
10. Yagoub M. Y.A., Swart H. C., Noto L. L., O'Connell J.H., Lee M. E., Coetsee E. // *J. Lumin.*, 2014, vol. 156, pp. 150—156.
11. Zhang C., Hou Z., Chai R., Cheng Z., Xu Z., Li C., Huang L., Lin J. // *J. Phys. Chem.*, 2010, vol. 114, pp. 6928—6936.
12. Peng J., Hou S., Liu X., Feng J., Yu X., Xing Y., Su Z. // *Mat. Res. Bull.*, 2012, vol. 47, pp. 328—332.
13. Sun J., Xian J., Zhang X., Du H. // *J. Rare Earth.*, 2011, vol. 29, pp. 32—38.
14. Sun J., Xian J., Du H. // *Appl. Surf. Sci.*, 2011, vol. 257, pp. 3592—3595.
15. Yagoub M. Y.A., Swart H. C., Noto L. L., Bergman P., Coetsee E. // *Materials*, 2015, vol. 8, pp. 2361—2375.
16. O'Connell J.H., Lee M. E., Yagoub M. Y.A., Swart H. C., Coetsee E. // *Phys. B*, 2016, vol. 480, pp. 169—173.
17. Quan Z., Yang D., Li C., Yang P., Cheng Z., Yang J., Kong D., Lin J. // *Mat. Res. Bull.*, 2009, vol. 44, pp. 1009—1016.
18. Rozhnova Yu.A., Kuznetsov S. V., Luginina A. A., Voronov V. V., Ryabova A. V., Pominova D. V., Ermak-



ov R. P., Usachev V. A., Kononenko N. E., Baranchikov A. E., Ivanov V. K., Fedorov P. P. // *Mat. Chem. Phys.*, 2016, vol. 172, pp. 150—157.

19. Рожнова Ю. А., Кузнецов С. В., Федоров П. П., Воронов В. В., Усачев В. А., Кононенко Н. Э., Хегай Д. К., Дукельский К. В. // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2015, т. 15, № 4, с. 578—586.

20. Rozhnova Yu. A., Luginina A. A., Voronov V. V., Ermakov R. P., Kuznetsov S. V., Ryabova A. V., Pominoва D. V., Arbenina V. V., Osiko V. V., Fedorov P. P. // *Mat. Chem. Phys.*, 2014, vol. 148, pp. 201—207.

21. Mayakova M. N., Luginina A. A., Kuznetsov S. V., Voronov V. V., Ermakov R. P., Baranchikov A. E., Ivanov V. K., Karban O. V., Fedorov P. P. // *Mendeleev Communications*, 2014, vol. 24, pp. 360—362.

22. Лугинина А. А., Федоров П. П., Кузнецов С. В., Маякова М. Н., Осико В. В., Иванов В. К., Баранчиков А. Е. // *Неорганические материалы*, 2012, т. 48, № 5, с. 617—624.

23. Sobolev B. P., Seiranian K. B., Garashina L. S., Fedorov P. P. // *J. Solid State Chem.*, 1979, vol. 28, pp. 51—58.

## SYNTHESIS OF UP-CONVERSION $\text{Ho}^{3+}$ AND $\text{Er}^{3+}$ DOPED STRONTIUM FLUORIDE LUMINOPHORES FOR VISUALISER OF TWO-MICRON RADIATION

©2016 Yu. A. Rozhnova, S. V. Kuznetsov, P. P. Fedorov, V. V. Voronov

A. M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Vavilov Str., 38, 119991 Moscow, Russia  
e-mail: ppfedorov@yandex.ru

Received 30.08.2016

**Abstract.** This paper reports synthesis of the single phase  $\text{Er}^{3+}$  and  $\text{Ho}^{3+}$  doped  $\text{SrF}_2$  solid solutions ( $\text{Sr}_{0.98-x}\text{Er}_{0.02}\text{Ho}_x\text{F}_{2.02+x}$ ,  $x = 0.005—0.100$ ) as prospective IR visualizers for 1.9—2.1 micron irradiation by co-precipitation from aqueous solutions with the use of ammonium hydrofluoride ( $\text{NH}_4\text{HF}_2$ ). Obtained  $\text{Sr}_{0.98-x}\text{Er}_{0.02}\text{Ho}_x\text{F}_{2.02+x}$  specimens exhibited an efficient up-conversion of the said 1.9—2.1 micron irradiation to the radiation in the red part of visible spectrum range.

**Keywords:** inorganic fluorides, solid solutions, up-conversion luminophores, IR visualizers.

### REFERENCES

1. Tressaud A., Poepelmeier K. *Photonic & Electronic Properties of Fluoride Materials*. Elsevier, 2016, Ed. 1, p. 534.

2. Kuznetsov S. V., Rozhnova Yu. A., Yasirkina D. S., Mayakova M. N., Pominoва D. V., Ryabova A. V., Voronov V. V., Fedorov P. P. «*Properties, design and applications of upconverting nanomaterials*», Conference book 1<sup>st</sup> Conference and Spring School, May 23—27, 2016, Wrocław, pp. 94.

3. Huang X., Han S., Huang W., Liu X. *Chem. Soc. Rev.*, 2013, vol. 42, pp. 173—201. DOI: 10.1039/c2cs35288e

4. Fedorov P. P., Luginina A. A., Popov A. I. *J. Fluor. Chem.*, 2015, vol. 172, pp. 22—50. doi:10.1016/j.jfluchem.2015.01.009

5. Fedorov P. P., Luginina A. A., Kuznetsov S. V., Osiko V. V. *J. Fluor. Chem.*, 2011, vol. 132, pp. 1012—1039. doi:10.1016/j.jfluchem.2011.06.025

6. Lyapin A. A., Ryabochkina P. A., Ushakov S. N., Fedorov P. P. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics], 2014, vol. 44, no. 6, pp. 602—605. 10.1070/QE2014v044n06ABEH015423

7. Lyapin A. A., Ryabochkina P. A., Chabushkin A. N., Ushakov S. N., Fedorov P. P. *Prikladnaya fotonika* [Applied photonics], 2014, no. 1, pp. 58—64. Available at: [http://applied.photonics.pstu.ru/\\_res/fs/4295file.pdf](http://applied.photonics.pstu.ru/_res/fs/4295file.pdf)

8. Lyapin A. A., Ryabochkina P. A., Chabushkin A. N., Ushakov S. N., Fedorov P. P. *J. Lumin.*, 2015, vol. 167, pp. 120—125. doi:10.1016/j.jlumin.2015.06.011

9. Jin Y., Qin W., Zhang J. *J. Fluor. Chem.*, 2008, vol. 129, no. 6, pp. 515—518. doi:10.1016/j.jfluchem.2008.03.010

10. Yagoub M. Y. A., Swart H. C., Noto L. L., O'Connell J. H., Lee M. E., Coetsee E. *J. Lumin.*, 2014, vol. 156, pp. 150—156. doi:10.1016/j.jlumin.2014.08.014

11. Zhang C., Hou Z., Chai R., Cheng Z., Xu Z., Li C., Huang L., Lin J. *J. Phys. Chem.*, 2010, vol. 114, pp. 6928—6936. DOI: 10.1021/jp911775z

12. Peng J., Hou S., Liu X., Feng J., Yu X., Xing Y., Su Z. *Mat. Res. Bull.*, 2012, vol. 47, no. 2, pp. 328—332. doi:10.1016/j.materresbull.2011.11.030

13. Sun J., Xian J., Zhang X., Du H. *J. Rare Earth.*, 2011, vol. 29, pp. 32—38. doi:10.1016/S1002—0721(10)60396—1

14. Sun J., Xian J., Du H. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, vol. 257, pp. 3592—3595. doi:10.1016/j.apsusc.2010.11.082
15. Yagoub M. Y.A., Swart H. C., Noto L. L., Bergman P., Coetsee E. *Materials*, 2015, vol. 8, pp. 2361—2375. doi:10.3390/ma8052361
16. O'Connell J.H., Lee M. E., Yagoub M. Y.A., Swart H. C., Coetsee E. *Physica B: Condensed Matter*, 2016, vol. 480, pp. 169—173. doi:10.1016/j.physb.2015.09.021
17. Quan Z., Yang D., Li C., Yang P., Cheng Z., Yang J., Kong D., Lin J. *Mat. Res. Bull.*, 2009, vol. 44, pp. 1009—1016. doi:10.1016/j.materresbull.2008.11.011
18. Rozhnova Yu.A., Kuznetsov S. V., Luginina A. A., Voronov V. V., Ryabova A. V., Pominova D. V., Ermakov R. P., Usachev V. A., Kononenko N. E., Baranchikov A. E., Ivanov V. K., Fedorov P. P. *Mat. Chem. Phys.*, 2016, vol. 172, pp. 150—157. doi:10.1016/j.matchemphys.2016.01.055
19. Rozhnova J. A., Kuznetsov S. V., Fedorov P. P., Voronov V. V., Usachev V. A., Kononenko N. E., Khegai D. K., Dukel'kiy K. V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 578—586. Available at: <http://ntv.ifmo.ru/file/article/13663.pdf>
20. Rozhnova Yu.A., Luginina A. A., Voronov V. V., Ermakov R. P., Kuznetsov S. V., Ryabova A. V., Pominova D. V., Arbenina V. V., Osiko V. V., Fedorov P. P. *Mat. Chem. Phys.*, 2014, vol. 148, pp. 201—207. doi: 10.1016/j.matchemphys.2014.07.032
21. Mayakova M. N., Luginina A. A., Kuznetsov S. V., Voronov V. V., Ermakov R. P., Baranchikov A. E., Ivanov V. K., Karban O. V., Fedorov P. P. *Mendeleev Communications*, 2014, vol. 24, pp. 360—362. doi:10.1016/j.mencom.2014.11.017
22. Luginina A.A., Fedorov P. P., Kuznetsov S. V., Mayakova M. N., Osiko V. V., Ivanov V. K., Baranchikov A. E. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 2012. vol. 48, no 5, с. 531—538. DOI: 10.1134/S002016851205010X
23. Sobolev B. P., Seiranian K. B., Garashina L. S., Fedorov P. P. *J. Solid State Chem.*, 1979, vol. 28, pp. 51—58. doi:10.1016/0022—4596(79)90057—4

*Рожнова Юлия Александровна* — аспирант, младший научный сотрудник, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН; тел.: +7 (499) 5038721, e-mail: [julia.r89@mail.ru](mailto:julia.r89@mail.ru)

*Кузнецов Сергей Викторович* — к. х. н., старший научный сотрудник, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН; тел.: +7 (499) 5038721, e-mail: [kouznetsovsv@gmail.com](mailto:kouznetsovsv@gmail.com)

*Воронov Валерий Вениаминович* — к. ф.-м. н., заведующий лабораторией, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН; тел.: +7 (499) 5038377, e-mail: [voronov@lst.gpi.ru](mailto:voronov@lst.gpi.ru)

*Федоров Павел Павлович* — д. х. н., профессор, заведующий лабораторией, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, тел.: +7 (499) 5038292, e-mail: [ppfedorov@yandex.ru](mailto:ppfedorov@yandex.ru)

*Rozhnova Juliya A.* — graduate student, Junior Researcher, A. M. Prokhorov General Physics Institute RAS; ph.: +7 (499) 5038721, e-mail: [julia.r89@mail.ru](mailto:julia.r89@mail.ru)

*Kuznetsov Sergey V.* — Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher, A. M. Prokhorov General Physics Institute RAS; ph.: +7 (499) 5038721, e-mail: [kouznetsovsv@gmail.com](mailto:kouznetsovsv@gmail.com)

*Voronov Valeriy V.* — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Laboratory Head, A. M. Prokhorov General Physics Institute RAS; ph.: +7 (499) 5038377, e-mail: [voronov@lst.gpi.ru](mailto:voronov@lst.gpi.ru)

*Fedorov Pavel P.* — Dr. Sci. (Chem.), Full Professor, Laboratory Head, A. M. Prokhorov General Physics Institute RAS; ph.: +7 (499) 5038292, e-mail: [ppfedorov@yandex.ru](mailto:ppfedorov@yandex.ru)