

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИНТЕЗА И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФТОРИДА КАЛЬЦИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ИТТЕРБИЕМ И ЭРБИЕМ, ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

© 2016 Р. Г. Вахренев<sup>1,2</sup>, М. Н. Маякова<sup>2</sup>, С. В. Кузнецов<sup>2</sup>, А. В. Рябова<sup>2</sup>,  
Д. В. Поминова<sup>2</sup>, В. В. Воронов<sup>2</sup>, П. П. Федоров<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Химический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, стр. 3, 119991 Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, ул. Вавилова, 38, 119991 Москва, Россия

<sup>3</sup>Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, ул. Большевикская, 68, Саранск, Россия  
e-mail: rvakhrenev@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.10.2016 г.

**Аннотация.** Методом соосаждения из водных растворов синтезированы порошки фторида кальция, легированного иттербием и эрбием и показано, что, независимо от типа фтор-агента и порядка смешения реагентов, образуется однофазный твердый раствор  $\text{Ca}_{1-x-y}\text{Yb}_x\text{Er}_y\text{F}_{2+x+y}$ . Данные сканирующей электронной микроскопии по размеру исходных частиц коррелируют с рентгенографическими данными по величине области когерентного рассеяния — 26 нм. На основе данных термогравиметрии определена температура термообработки: 600 °С. Достигнуты высокие величины энергетического выхода (около 3 %) при совместном и обратном порядке смешения реагентов.

**Ключевые слова:** осаждение из водных растворов, фторид кальция, легирование, редкоземельные элементы, ап-конверсионная люминесценция.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из интенсивно развивающихся областей фотоники являются ап-конверсионные люминофоры, которые позволяют преобразовывать ближнее инфракрасное (БИК) излучение накачки в видимый диапазон света. В настоящее время такие люминофоры при использовании сочетания  $\text{Yb}^{3+}$ :  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ :  $\text{Tm}^{3+}$  рассматриваются в качестве перспективных для биомедицинских приложений. Ап-конверсионные люминофоры были предложены более 50 лет тому назад независимо друг от друга Овсянкиным в СССР [1] и Озелем во Франции [2]. Одним из наиболее изучаемых классов веществ для биомедицинских приложений являются фториды; особенно много исследований проводится на основе гексагональной модификации  $\text{NaYF}_4$  [3]. Другие классы веществ обладают рядом существенных недостатков. Органические и металлоорганические вещества быстро фотодеградируют и их полосы возбуждения зачастую расположены в области непрозрачности тканей. Квантовые точки на основе селенидов и сульфидов токсичны.

Оксиды обладают меньшим энергетическим выходом люминесценции и трудностью легирования редкоземельными элементами (РЗЭ). Для синтеза нанопорошков фторидов преимущественно используют гидро- или сольвотермальный методы синтеза как при обычном нагреве, так и микроволновом [4—11]. В настоящее время гораздо реже используют механохимический помол исходных веществ в высокоэнергетических мельницах [12], осаждение из растворов в нанореакторах [13], горение [14] и синтез в обращенных микроэмульсиях [15]. Отдельного внимания заслуживает метод осаждения из водных растворов, позволяющий синтезировать субмикронные порошки, обладающие высоким энергетическим выходом ап-конверсионной люминесценции [16] и пригодные для изготовления фторидной оптической керамики [17—19]. Как было нами ранее показано, твердые растворы на основе фторида стронция с редкоземельными элементами обладают высоким энергетическим выходом ап-конверсионной люминесценции. Образцы на основе фторида бария не образу-

ют однофазных твердых растворов при концентрации редкоземельного элемента порядка единиц мольных процентов, а являются двухфазными, состоящими из  $BaF_2$  и твердого раствора  $Ba_{4\pm x}R_{3\mp x}F_{17\mp x}$  [20, 21]. Синтез твердых растворов на основе фторида кальция с РЗЭ применительно для биомедицинских приложений методом соосаждения из водных растворов мало исследован, и это при том, что фторид кальция является биосовместимым апробированным материалом, в том числе и для стоматологии [11]. В связи с этим целью данной работы являлось исследование синтеза и люминесцентных характеристик фторида кальция, легированного иттербием и эрбием.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных веществ для синтезов использовали:  $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$  (ВЕКТОН) марки Х.Ч.,  $Yb(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$  (ЛАНХИТ) чистотой 99.99 %,  $Er(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$  (ЛАНХИТ) чистотой 99.99 %,  $NH_4F$  (ХИММЕД) марки Ч., HF (ХИММЕД) марки ОС.Ч. 27—5 и бидистиллированную воду. Образцы исследовали методом рентгенофазового анализа на дифрактометре BRUKER D8 Advance с  $CuK_\alpha$  излучением. Расчёт параметров решётки осуществляли в программе TOPAS. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) проведена на микроскопе Carl Zeiss NVision 40. Для люминесцентных исследований использована установка для лазерно-индуцированной люминесцентной спектроскопии, включающей волоконно-оптический спектроанализатор ЛЭСА-01-Биоспек. Значения энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции в видимом диапазоне спектра измеряли с помощью

установки, в которой исследуемый образец помещался в модифицированную интегрирующую сферу производства Avantes. Возбуждение ап-конверсионной люминесценции осуществляли лазером с длиной волны 974 нм (ЗАО «Биоспек», г. Москва, Россия) и мощностью 1 Вт. Спектральные данные анализировали с помощью программы обработки спектров UnoMomento с учетом аппаратной функции спектрометра и интегрирующей сферы. Термогравиметрия проведена на дериватографе MOM Q-1500 D в платиновых тиглях на воздухе до температуры 600 °С, скорость нагрева — 10 град/мин.

В ходе работы была использована методика соосаждения нитратов кальция и редкоземельных элементов (0.2 М) из водного раствора с различными фторирующими агентами: HF (5 % об.) и  $NH_4F$  (0.62 М), и три способа смешения растворов. Прикапывание раствора нитратов кальция и РЗЭ в реактор с раствором фторирующего агента (прямой синтез), прикапывание раствора фторирующего агента в реактор с растворами нитратов (обратный синтез) или одновременное сливание фторирующего агента с растворами нитратов в воду (совместный синтез). Для отделения осадка из получившегося раствора была использована центрифуга (8000 об/мин, 5 мин), а также проводили т. н. вызревание осадка, когда осадок в течение длительного времени (около 1 месяца) сам высаживался на дно. Полученный осадок промывали и сушили при 45 и 600 °С на воздухе.

Синтезированные образцы были однофазными и соответствовали фториду кальция, легированному редкоземельными элементами (рис. 1а).

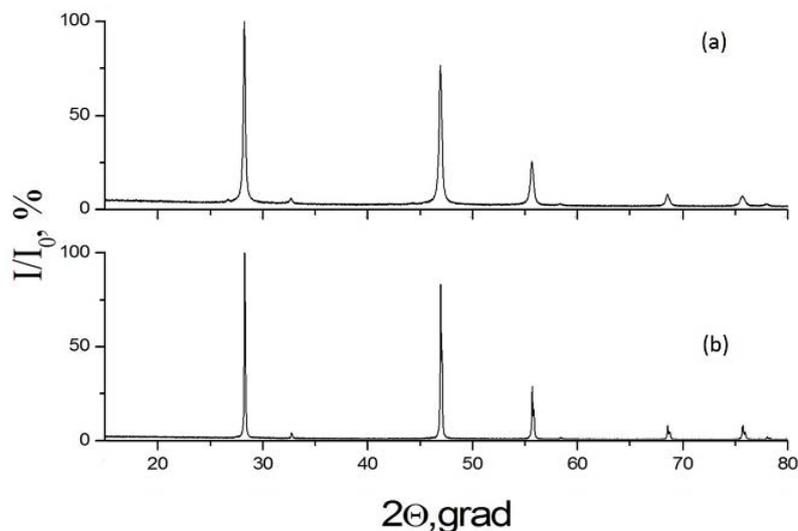


Рис. 1. Рентгенограмма образца  $Ca_{0.94}Yb_{0.05}Er_{0.01}F_{2.06}$  после сушки при 45 °С (а) и после отжига при 600 °С (б)

По данным СЭМ образца F1075  $\text{Ca}_{0.94}\text{Yb}_{0.05}\text{Er}_{0.01}\text{F}_{2.06}$ , высушенного при температуре  $45^\circ\text{C}$ , исходные частицы слабоагломерированы и имеют размер около 30 нм (рис. 2), который согласуется с рассчитанной величиной размера области когерентного рассеяния — 26 нм.

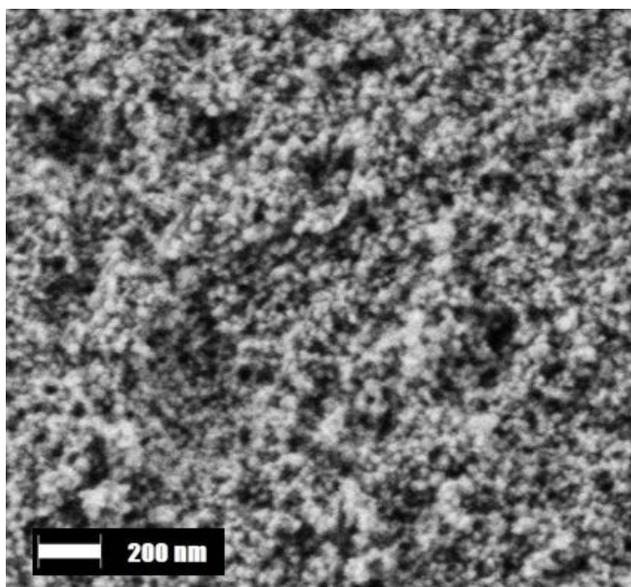


Рис. 2. СЭМ образца F1075  $\text{Ca}_{0.94}\text{Yb}_{0.05}\text{Er}_{0.01}\text{F}_{2.06}$ , высушенного при температуре  $45^\circ\text{C}$

Высушенные при  $45^\circ\text{C}$  образцы были не люминесцентными, вследствие чего была проведена термогравиметрия для определения температуры термообработки (рис. 3).

Анализ показывает, что процесс дегидратации идет в 2 стадии, которые согласно кривой DTG заканчиваются при температурах 188 и  $407^\circ\text{C}$ . Изменение веса по кривой TG заканчивается при температуре  $500^\circ\text{C}$ , в связи с чем для сушки необходимо использовать температуру более  $500^\circ\text{C}$ . Для обеспечения полноты дегидратации была выбрана температура  $600^\circ\text{C}$ . Дифрактограмма отожжённого образца представлена на рис. 1b, из которого видно, что образец остался однофазным, но пики заметно сузились из-за увеличения размера частиц. Для отожжённых при  $600^\circ\text{C}$  образцов были рассчитаны параметры решетки (табл. 1), зарегистрированы спектры люминесценции (рис. 4) и оценены энергетические выходы ап-конверсионной люминесценции для твердого раствора  $\text{Ca}_{0.94}\text{Yb}_{0.05}\text{Er}_{0.01}\text{F}_{2.06}$  при варьировании условий синтеза (табл. 1).

На рис. 4 различимы характеристические полосы люминесценции эрбия, расположенные в красной (659 нм) и зеленой (545 и 523 нм) частях спектра [18, 19, 22].

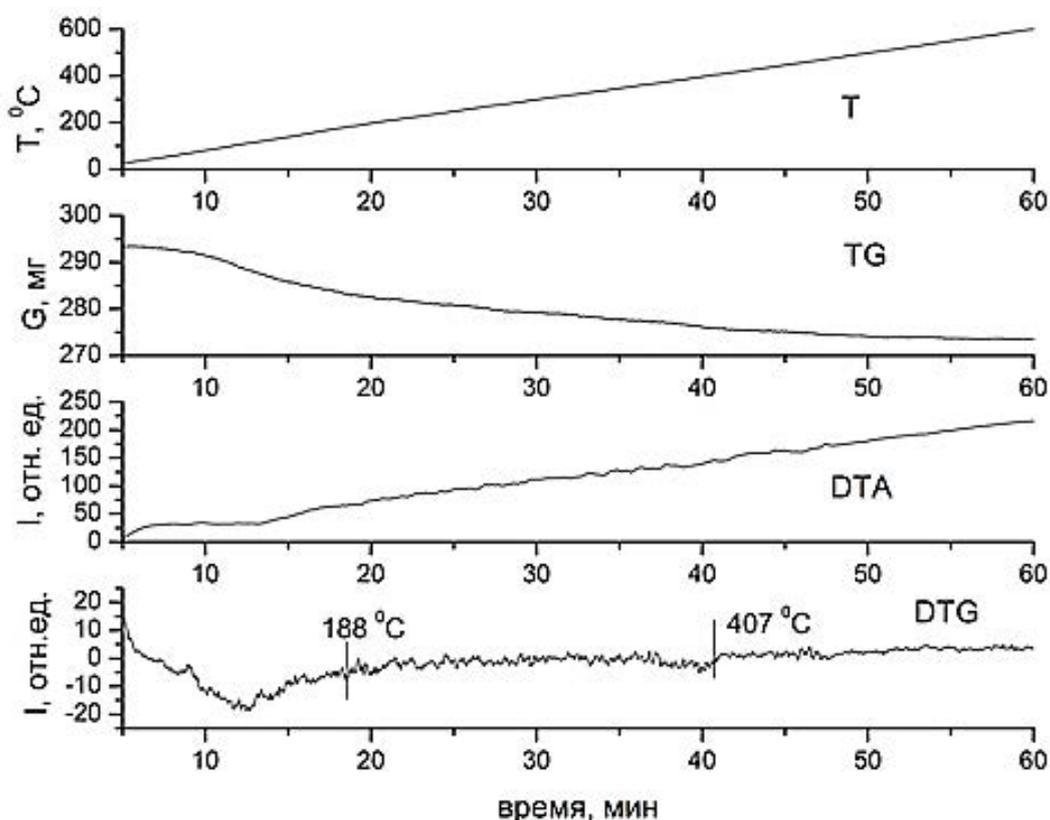
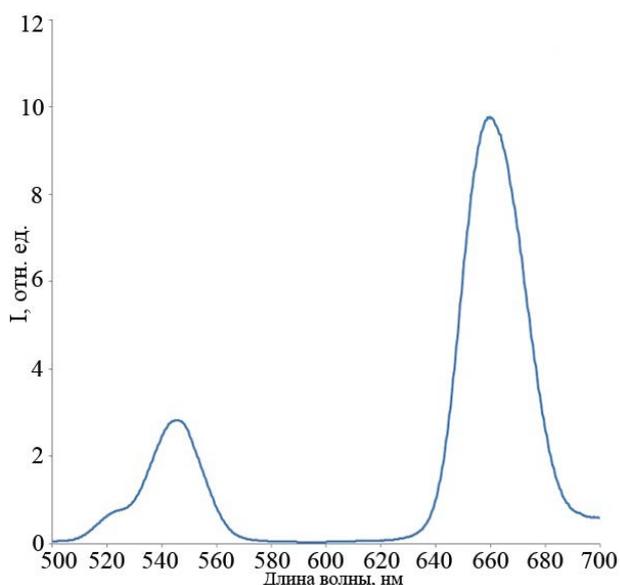


Рис. 3. Результаты термогравиметрии образца F1070  $\text{Ca}_{0.94}\text{Yb}_{0.05}\text{Er}_{0.01}\text{F}_{2.06}$

**Таблица 1.** Результаты синтеза для состава  $\text{Ca}_{0.94}\text{Yb}_{0.05}\text{Er}_{0.01}\text{F}_{2.06}$ .

Номер синтеза	Порядок подачи реагентов	Фторирующий агент	Центрифугирование	Энергетический выход, %	Параметр решётки образцов, прокаленных при 600 °С, Å
F-935	Прямой	HF(5 об.%)	Нет	1.30	5.4779
F-1075	Прямой	HF(5 об.%)	Да	1.19	5.4749
F-1070	Обратный	HF(5 об.%)	Нет	2.20	5.4772
F-1071	Обратный	HF(5 об.%)	Да	2.75	5.4762
F-1119	Совместный	HF(5 об.%)	Да	3.11	5.4737
F-1073	Прямой	$\text{NH}_4\text{F}$	Нет	1.00	5.4752
F-1074	Прямой, быстрое сливание	$\text{NH}_4\text{F}$	Да	1.66	5.4772
F-1076	Прямой	$\text{NH}_4\text{F}$	Да	1.30	5.4749
F-1077	Обратный	$\text{NH}_4\text{F}$	Да	1.60	5.4754
F-1072	Обратный	$\text{NH}_4\text{F}$	Нет	2.02	5.4754
F-1120	Совместный	$\text{NH}_4\text{F}$	Нет	1.18	5.4734
F-1126	Совместный	$\text{NH}_4\text{F}$	Да	2.62	5.4725



**Рис. 4.** Спектр люминесценции образца F1071  $\text{Ca}_{0.94}\text{Yb}_{0.05}\text{Er}_{0.01}\text{F}_{2.06}$

Анализ данных табл. 1 показал, что величины параметров решетки достаточно близки, в то время как значения энергетического выхода различаются. Сравнение способов синтеза показывает, что при прямом порядке смешения как при использовании HF, так и  $\text{NH}_4\text{F}$  величины энергетического выхода являются сопоставимыми. При использовании обратной методики значения энергетического выхода выше, чем при прямом способе смешения, а при использовании совместной методики синтеза энергетический выход является наибольшим и достигает 2.62 и 3.11 % при использовании  $\text{NH}_4\text{F}$  и HF соответственно.

### ВЫВОДЫ

Анализ рентгенографических данных по синтезу порошков фторида кальция, легированных иттербием и эрбием, показал, что, независимо от типа фтор-агента и порядка смешения реагентов, образу-

ется однофазный твердый раствор  $\text{Ca}_{1-x-y}\text{Yb}_x\text{Er}_y\text{F}_{2+x+y}$ . Данные сканирующей электронной микроскопии по размеру исходных частиц коррелируют с рентгенографическими данными по величине области когерентного рассеяния — 26 нм. На основе данных термогравиметрии была выбрана температура термообработки: 600 °С. Таким образом, были определены оптимальные условия синтеза, что позволило получить ап-конверсионные люминофоры с высокими значениями энергетического выхода, около 3 %, при совместном и обратном порядке смешения реагентов.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 15-32-21152-мол-а-вед и 15-08-02481).*

*Авторы выражают благодарность с. н. с., к. х. н. Баранчикову А. Е. (ИОНХ РАН) за проведение сканирующей электронной микроскопии.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овсянкин В. В., Феофилов П. П. // *Письма в ЖЭТФ*, 1966, т. 3, с. 322—323.
2. Auzel F. // *C. R. Acad. Sci.*, 1966, vol. 262, pp. 1016—1019.
3. Tressaud A., Poeppelmeier K. *Photonic & Electronic Properties of Fluoride Materials*. Elsevier, 2016, ed. 1, 544 p.
4. Holsa J., Laamanen T., Laihinен T., Lastusaari M., Pihlgren L., Rodrigues L. C. V. // *Optical Materials*, 2014, vol. 36, pp. 1627—1630.
5. Anghel S., Golbert S., Meijerink A., Mudring A.-V. // *J. of Luminescence*. in press.
6. Safronikhin A., Ehrlich H., Lisichkin G. // *J. of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 694, pp. 1182—1188.
7. Kuzmanoski A., Pankratov V., Feldmann C. // *J. of Luminescence*, 2016, vol. 179, pp. 555—561.
8. Ye W., Huang Q., Liu X., Hu G. // *Acta Materialia*, 2017, vol. 122, pp. 420—430.
9. Lorbee C., Cybinska J., Zych E., Mudring A.-V. // *Optical Materials*, 2011, vol. 34, pp. 336—340.
10. Witter R., Roming M., Feldmann C., Ulrich A. S. // *J. of Colloid and Interface Science*, 2013, vol. 390, pp. 250—257.
11. Sun L., Chow L. C. // *Dental Materials*, 2008, vol. 24, № 1, pp. 111—116.
12. Lu J., Zhang Q., Saito F. // *Chem. Lett.*, 2002, vol. 31, pp. 1176.
13. Fujihara S., Mochizuki C., Kimura T. // *J. Non-Cryst. Solids*, 1999, vol. 244, pp. 267.
14. Nagai M., Nishino T. // *Solid State Ionics*, 1997, vol. 99, pp. 221—224.
15. Rakov N., Guimaraes R. B., Franceschini D. F., Maciel G. S. // *Materials Chemistry and Physics*, 2012, vol. 135, pp. 317—321.
16. Кузнецов С. В., Осико В. В., Ткаченко Е. А., Федоров П. П. // *Успехи химии*, 2006, № 12, т. 75, с. 1193—1211.
17. Рожнова Ю. А., Кузнецов С. В., Воронов В. В., Федоров П. П. // *Конденсированные среды и межфазные границы*, 2016, т. 18, с. 408—413.
18. 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. // *Materials Chemistry and Physics*, 2014, vol. 148 (1—2), pp. 201—207.
19. 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. // *Materials Chemistry and Physics*, 2016, vol. 172, pp. 150—157.
20. Fedorov P. P., Mayakova M. N., Kuznetsov S. V., Voronov V. V., Ermakov R. P., Samarina K. S., Popov A. I., Osiko V. V. // *Materials Research Bulletin*, 2012, vol. 47, pp. 1794—1799.
21. Karbowski M., Cichos J. // *J. Alloys and Compounds*, 2016, vol. 673, pp. 258—264.
22. Dieke G. H., Crosswhite H. M. // *Appl. Optics*, 1963, vol. 2, pp. 675—686.

## THE RESEARCH OF SYNTHESIS AND LUMINESCENT CHARACTERISTICS OF CALCIUM FLUORIDE DOPED WITH YTTERBIUM AND ERBIUM FOR BIOMEDICAL APPLICATION

©2016 R. G. Vahrenev<sup>1,2</sup>, M. N. Mayakova<sup>2</sup>, S. V. Kuznetsov<sup>2</sup>, A. V. Ryabova<sup>2</sup>, D. V. Pominova<sup>2</sup>, V. V. Voronov<sup>2</sup>, P. P. Fedorov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Chemistry Department, Lomonosov Moscow State University, 119991 Moscow, Russia

<sup>2</sup>A. M. Prokhorov General Physics Institute RAS, 38 Vavilov Str., 119991 Moscow, Russia

<sup>3</sup>Ogarev Mordovia State University 68 Bolshevistskaya Str., 430005 Republic of Mordovia, Saransk, Russia  
e-mail: rvakhrenev@yandex.ru

Received 17.10.2016

**Abstract:** The work deals with the synthesis and luminescent properties of calcium fluoride doped with ytterbium (5 mol.%) and erbium (1 mol.%). For synthesis technique was used co-precipitation from aqueous solutions, which comprises reacting aqueous solutions of calcium nitrate and rare-earth elements (0.2 M) with aqueous solutions of various fluorinating agents: HF (5 vol.%) or  $\text{NH}_4\text{F}$  (0.62 M) with varying methods of mixing solutions. Dropping the solution of calcium nitrate and rare earths elements into reactor with fluorinating agent named direct synthesis, dropping the fluorinating agent solution into the reactor with nitrate solutions named reverse synthesis, simultaneous dropping fluorinating agent with solutions of nitrates in water (joint synthesis). Centrifuge (8000 rpm, 5 min) and aging in during time (about 1 month) was used for separation of the precipitate from the mother solution. The resulting precipitate was washed and dried in air at 45 and 600 °C. SEM data size of the precursor particles correlate with largest coherent scattering region — 26 nm. The study determined that when using a reverse procedure the values of the energy yield is higher than the direct method of mixing. When using joint methods of synthesis and centrifugation energy yield is the highest, reaching 2.62 and 3.11 % with  $\text{NH}_4\text{F}$  and HF, respectively. In summary it can be noted that in order to achieve high energy yield should be used joint mixing procedure with centrifugation.

**Keywords:** precipitation from water solution, calcium fluoride, rare earth elements, upconversion luminescence.

#### REFERENCES

- Ovsyankin V. V., Feofilov P. P. *Pis'ma v ZhETF*, 1966, vol. 3, pp. 322—323.
- Auzel F. C. *R. Acad. Sci.*, 1966, vol. 262, pp. 1016—1019.
- Tressaud A., Poeppelmeier K. *Photonic & Electronic Properties of Fluoride Materials*. Elsevier, 2016, ed. 1, 544 p.
- Holsa J., Laamanen T., Laihininen T., Lastusaari M., Pihlgren L., Rodrigues L. C. V. *Optical Materials*, 2014, vol. 36, pp. 1627—1630. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2013.12.004>
- Anghel S., Golbert S., Meijerink A., Mudring A.-V. *J. of Luminescence, in press*. DOI: 10.1016/j.jlumin.2016.10.007
- Safronikhin A., Ehrlich H., Lisichkin G. *J. of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 694, pp. 1182—1188, DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.10.128.
- Kuzmanoski A., Pankratov V., Feldmann C. *J. of Luminescence*, 2016, vol. 179, p. 555—561. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.07.040>
- Ye W., Huang Q., Liu X., Hu G. *Acta Materialia*, 2017, vol. 122, pp. 420—430. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.10.013>
- Lorbee C., Cybinska J., Zych E., Mudring A.-V. *Optical Materials*, 2011, vol. 34, pp. 336—340. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2011.04.019>
- Witter R., Roming M., Feldmann C., Ulruch A. S. *J. of Colloid and Interface Science*, 2013, vol. 390, pp. 250—257. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2012.09.001>
- Sun L., Chow L. C. *Dental Materials*, 2008, vol. 24, no. 1, pp. 111—116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dental.2007.03.003>
- Lu J., Zhang Q., Saito F. *Chem. Lett.*, 2002, vol. 31, p. 1176.
- Fujihara S., Mochizuki C., Kimura T. *J. Non-Cryst. Solids*, 1999, vol. 244, pp. 267—274. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093\(99\)00009-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093(99)00009-5)
- Nagai M., Nishino T. *Solid State Ionics*, 1997, vol. 99, pp. 221—224. DOI:10.1016/S0167-2738(97)00251-8
- Rakov N., Guimaraes R. B., Franceschini D. F., Maciel G. S. *Materials Chemistry and Physics* 2012, vol. 135, pp. 317—321. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.04.048>
- Kuznetsov S. V., Osiko V. V., Tkachenko E. A., Fedorov P. P. *Uspekhi khimii*, 2006, no. 12, vol. 75, pp. 1193—1211.
- Rozhnova Yu. A., Kuznetsov S. V., Fedorov P. P., Voronov V. V. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy* [Condensed Matter and Interphases], 2016, vol. 18, pp. 408—413. Available at: [http://www.kcmf.vsu.ru/resources/t\\_18\\_3\\_2016\\_012.pdf](http://www.kcmf.vsu.ru/resources/t_18_3_2016_012.pdf)
- 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. *Materials Chemistry and Physics*, 2014, vol. 148 (1—2), pp. 201—207. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.07.032>
- Rozhnova Yu. A., Kuznetsov S. V., Luginina A. A., Voronov V. V., Ryabova A. V., Pominoва D. V., Ermakov R. P., Usachev V. A., Kononenko N. E., Baranchikov A. E., Ivanov V. K., Fedorov P. P. *Materials Chemistry and Physics*, 2016, vol. 172, pp. 150—157.
- Fedorov P. P., Mayakova M. N., Kuznetsov S. V., Voronov V. V., Ermakov R. P., Samarina K. S., Popov A. I., Osiko V. V. *Materials Research Bulletin*, 2012, vol. 47, pp. 1794—1799. <http://dx.doi.org/10.1016/j.materresbull.2012.03.027>
- Karbowiak M., Cichos J. *J. Alloys and Compounds*, 2016, vol. 673, pp. 258—264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.02.255>
- Dieke G. H., Crosswhite H. M. *Appl. Optics*, 1963, vol. 2, pp. 675—686.

*Вахренев Роман Геннадьевич* — студент МГУ им. Ломоносова, техник, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН; тел.: +7 (499) 5038721, e-mail: rvakhrenev@yandex.ru

*Маякова Мария Николаевна* — младший научный сотрудник, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН; тел.: +7 (499) 5038371, e-mail: mn.mayakova@gmail.com

*Кузнецов Сергей Викторович* — к. х. н., старший научный сотрудник, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН; тел.: +7 (499) 5038292, e-mail: kouznetzovsv@gmail.com

*Рябова Анастасия Владимировна* — к. ф.-м. н., н. с., Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН; тел.: +7 (499) 5038111, e-mail: nastya.ryabova@gmail.com

*Поминова Дарья Владимировна* — н. с., Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН; тел.: +7 (499) 5038111, e-mail: pominovadv@rambler.ru

*Воронов 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

*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

*Vakhrenev R. G.* — student of Chemistry Department, Lomonosov Moscow State University, Technician of A. M. Prokhorov General Physics Institute RAS; ph.: +7 (499) 5038721, e-mail: rvakhrenev@yandex.ru

*Mayakova Mariya N.* — Junior Researcher, A. M. Prokhorov General Physics Institute RAS; ph.: +7 (499) 5038371, e-mail: mn.mayakova@gmail.com

*Kuznetsov Sergey V.* — Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher, A. M. Prokhorov General Physics Institute RAS; ph.: +7 (499) 5038292, e-mail: kouznetzovsv@gmail.com

*Ryabova Anastasia V.* — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, A. M. Prokhorov General Physics Institute RAS; ph.: +7 (499) 5038111, e-mail: nastya.ryabova@gmail.com

*Pominova Daria V.* — Researcher, A. M. Prokhorov General Physics Institute RAS; ph.: +7 (499) 5038111, e-mail: pominovadv@rambler.ru

*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

*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