НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, 2022, том 58, № 1, с. 95–101

УДК 546.05+546.65+548.5

ВЛИЯНИЕ СОВЕРШЕНСТВА КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ЛЮМИНОФОРА β-$NaYF_4$:Yb,Er НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АП-КОНВЕРСИОННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

© 2022 г.
А. А. Александров[1, 2], М. Н. Маякова[1], С. В. Кузнецов[1], В. В. Воронов[1], Д. В. Поминова[1], В. К. Иванов[2], П. П. Федоров[1, *]

[1]*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, ул. Вавилова, 38, Москва, 119991 Россия*
[2]*Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук, Ленинский пр., 31, Москва, 119991 Россия*
**e-mail: ppfedorov@yandex.ru*

Поступила в редакцию 28.07.2021 г.
После доработки 07.09.2021 г.
Принята к публикации 08.09.2021 г.

Проведена серия синтезов фторида натрия-иттрия, легированного иттербием и эрбием, путем химической реакции фторида натрия с нитратами редкоземельных элементов в расплаве нитрата натрия. Использовали семикратный избыток фторирующего агента. Температурный режим синтезов 320–450°C, продолжительность процесса варьировали от 15 до 500 мин. После отмывки бидистиллированной водой полученные порошки характеризовали методами рентгенофазового анализа с расчетом областей когерентного рассеяния и микродеформаций, растровой электронной микроскопии, а также регистрировали ап-конверсионную люминесценцию при длине волны возбуждения 974 нм. Определена величина энергетического выхода люминесценции. В процессе синтезов получены однофазные образцы гексагональнго β-$NaYF_4$, причем наблюдалось формирование искаженных гексагональных призм фазы путем срастания наночастиц. Обнаружено, что величина энергетического выхода люминесценции нелинейно зависит от величин микродеформаций e_0 кристаллов β-фазы, резко возрастая при уменьшении e_0. Уменьшение дефектности частиц порошков является эффективной стратегией увеличения эффективности ап-конверсионной люминесценции.

Ключевые слова: фториды, гагаринит, ап-конверсионная люминесценция, нитрат натрия, раствор-расплав

DOI: 10.31857/S0002337X22010018

ВВЕДЕНИЕ

Фаза гексагональной структуры, образующаяся в системе NaF–YF_3, имеющая приблизительный состав 1 : 1, является основой эффективного люминофора, преобразующего инфракрасное излучение в видимое [1–3]. Для этого требуется легирование другими редкоземельными ионами, в первую очередь комбинациями Yb-Er и Yb-Tm [4]. В литературе используется наименование “β-$NaYF_4$”, которое мы сохраним в данной статье. На самом деле это фаза переменного состава, имеющая кристаллическую структуру природного минерала гагаринита, корректная формула которой может быть записана как $Na_{3x}Y_{2-x}F_6$, где $x \sim 0.5$. Маркировка “β” используется для того, чтобы отличить эту фазу от высокотемпературной кубической α-фазы переменного состава со структурой флюорита с общей формулой $Na_{0.5-x}Y_{0.5+x}F_{2+2x}$ [5]. Особенностям синтеза, связи реальной структуры и люминесцентных характеристик β-$NaYF_4$ посвящено огромное количество статей [6–45].

Формирование частиц гексагонального β-$NaYF_4$ в процессах низкотемпературного синтеза протекает весьма своеобразно. В частности, было показано [46], что первоначально в результате химических реакций образуются мелкие наночастицы метастабильной кубической α-фазы, которые потом претерпевают кооперативный процесс формирования более крупных частиц, меняя при этом свою кристаллическую структуру. Детально этот процесс изучен в работах [6, 47]. Дальнейший рост гексагональных частиц $NaRF_4$ также зачастую происходит по сценариям неклассического роста кристаллов [48, 49]. Наблюдаются явления т. н. обратного роста, когда сначала наночастицы формируют внешнюю оболочку кристаллитов микронных размеров, а потом происходит процесс заполнения внутренности кристаллическим материалом [50].

Нами проверены возможности синтеза фаз типа $NaRF_4$ из нитратных расплавов [5]. Методика синтеза из нитратов хороша дешевизной и простотой аппаратурного оформления [51, 52]. В работе [53] проведена серия синтезов $NaYF_4$:Yb,Er из расплава $NaNO_3$ в температурном диапазоне 320–350°C при варьировании времени выдержки. Обнаружено, что первоначально формирующейся фазой является кубическая модификация, которая превращается в гексагональную фазу за время порядка 30 мин. Однако при этом величины энергетического выхода люминесценции синтезированных образцов β-$NaYF_4$:Yb,Er были низкими.

Целью данной работы, в продолжение [53], было увеличение световыхода люминесценции порошков $NaYF_4$:Yb,Er, полученных из нитратного расплава. Работа докладывалась на конференции [54].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы синтезировали из раствора в расплаве по методике [53]. В качестве исходных реагентов использовали: шестиводный нитрат иттрия $Y(NO_3)_3{\cdot}6H_2O$ (“Ланхит”, чистота 99.9% по катионным примесям), шестиводный нитрат иттербия $Yb(NO_3)_3{\cdot}6H_2O$ (“Ланхит”, чистота 99.9% по катионным примесям), пятиводный нитрат эрбия $Er(NO_3)_3{\cdot}5H_2O$ (“Ланхит”, чистота 99.9% по катионным примесям), фторид натрия NaF (химзавод фторсолей, “ч.”), нитрат натрия $NaNO_3$ (Химмед, “х. ч.”) без дополнительной очистки. Использовали семикратный избыток фторирующего агента (NaF) по сравнению со стехиометрией. Номинальный состав образцов соответствовал формуле $NaY_{0.78}Yb_{0.20}Er_{0.02}F_4$, отвечающей оптимальному составу ап-конверсионного люминофора.

Образцы были охарактеризованы с помощью рентгенофазового анализа (**РФА**), растровой электронной микроскопии (**РЭМ**), рентгеноспектрального микроанализа и люминесцентной спектроскопии. РФА проводили на дифрактометре Bruker D8 Advanced (Германия) с CuK_α-излучением. Обработку данных – расчет параметров решетки, величин микронапряжений e_0 и размеров областей когерентного рассеяния (**ОКР**) D вели при помощи программного обеспечения TOPAS. РЭМ проводили на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss NVision 40 (Германия) с микрозондовым анализатором Oxford Instruments 80 mm^2 (Великобритания) для рентгеноспектрального микроанализа. Измерения люминесцентной спектроскопии проводили с использованием схемы, состоящей из оптоволоконного спектрометра LESA-01-BIOSPEC (BIOSPEC, Россия), на программном обеспечении UnoMomento, в модифицированной интегрирующей сфере (Avantes, Нидерланды), которые соединены оптоволоконными световодами. Были зарегистрированы спектры ап-конверсионной люминесценции и диффузионно-рассеянное возбуждающее лазерное излучение в диапазоне 300–1000 нм [3]. Расчет энергетического выхода (EQ) ап-конверсионной люминесценции проводили по следующей формуле:

$$EQ = \frac{P_e^S}{P_{974_ab}^S} = \frac{P_e^S}{P_{974_sc}^R - P_{974_sc}^S}, \quad (1)$$

где P_e^S – мощность излучения образца в видимом диапазоне; $P_{974_ab}^S$ – мощность лазера, поглощенная образцом, которая равняется разности между $P_{974_sc}^R$ – мощностью рассеянного излучения от непоглощающего образца сравнения и $P_{974_sc}^S$ – мощностью рассеянного излучения от изучаемого образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При продолжительности синтеза 15 мин был получен двухфазный образец, на рентгенограмме которого присутствовали линии метастабильной кубической фазы и стабильной гексагональной β-фазы. Увеличение продолжительности синтеза вело к получению однофазных гексагональных образцов (см. табл. 1, рис. 1). Образцы 1–6 описаны ранее [53].

Результаты РФА представлены на рис. 1. Рентгенограмма проиндицирована с отнесением пиков к гексагональной структуре $NaYF_4$, пр. гр. $P63/m$.

На рис. 2 и 3 представлены микрофотографии синтезированных образцов. Видно, что при увеличении времени выдержки из наночастиц вытянутой неправильной формы (рис. 2а) начинают формироваться гексагональные призмы микронных размеров. Очевидно, что эти призмы образуются путем срастания частиц меньших размеров (рис. 2в, 2г), причем сохраняется популяция наноразмерных частиц. Образующиеся в конечном счете частицы в форме гексагональных призм (рис. 2д, 2е) неоднородны по размерам, имеют условную огранку и множество видимых дефектов, каверны на поверхности и, вероятно, полости в объеме.

Таким образом, величины ОКР, рассчитанные из уширения линий на рентгенограммах, носят условный характер из-за существенной неоднородности исследованного материала. Другие методы синтеза люминофора β-$NaYF_4$:Yb,Er (например, метод гидротермального синтеза) позволяют получать порошки существенно лучших однородности и кристаллического совершенства. Тем не менее, дефекты на поверхности образующихся гексагональных призм наблюдаются систематически

Таблица 1. Характеристики синтезированных образцов

Образец	t, °C	τ, мин	a, Å	c, Å	D, нм	e_0	EQ, %
1	320	15	5.9970(5)	3.5130(4)	67(5)	0.046(8)	0.73
			5.4730(5) (куб.)	–			
2	330	30	5.9758(4)	3.5138(3)	72(1)	0.079(7)	0.85
3	340	45	5.9601(2)	3.5121(2)	102(3)	0.099(3)	0.50
4	350	60	5.9714(2)	3.5155(1)	119(5)	0.084(3)	0.68
5	350	180	5.9707(2)	3.5181(1)	135(3)	0.088(2)	0.57
6	350	500	5.9733(1)	3.5169(1)	866(124)	0.067(2)	2.25
7	450	120	5.9668(1)	3.5191(1)	1041(154)	0.039(1)	4.76

Примечание. D – размер ОКР, e_0 – величина микронапряжений, EQ – энергетический выход люминесценции.

(см., например, [41]). Отсутствие правильной огранки образующихся частиц является характерным признаком неклассического механизма образования кристаллов путем ориентированного сращивания частиц [55].

На синтезированной серии образцов можно проследить влияние совершенства кристаллической структуры частиц люминофора на эффективность ап-конверсионнной люминесценции.

На рис. 4 представлен спектр люминесценции образца 7. Длина волны возбуждения составляет 974 нм, плотность мощности накачки 1 Вт/см^2. На рис. 4 обозначены электронные переходы ионов эрбия, к которым могут быть отнесены полосы люминесценции. Спектры люминесценции остальных образцов имеют аналогичный характер, но полосы люминесценции имеют меньшую интенсивность, что количественно характеризуется величиной энергетического выхода EQ (см. табл. 1).

Совершенство порошков люминофора может быть количественно охарактеризовано величиной микродеформаций e_0, рассчитываемых из рентгенограмм (см. табл. 1). В процессе синтезов

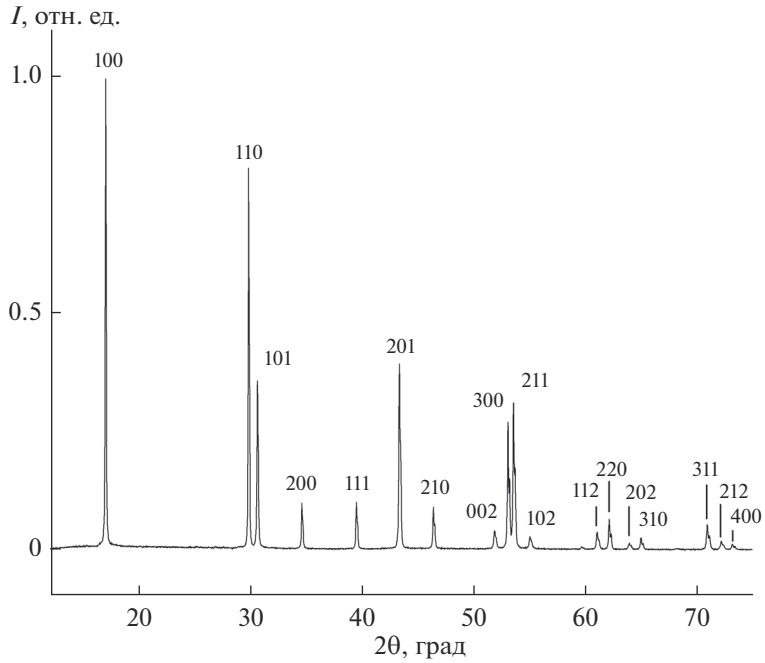

Рис. 1. Рентгенограмма образца 7 (см. табл. 1).

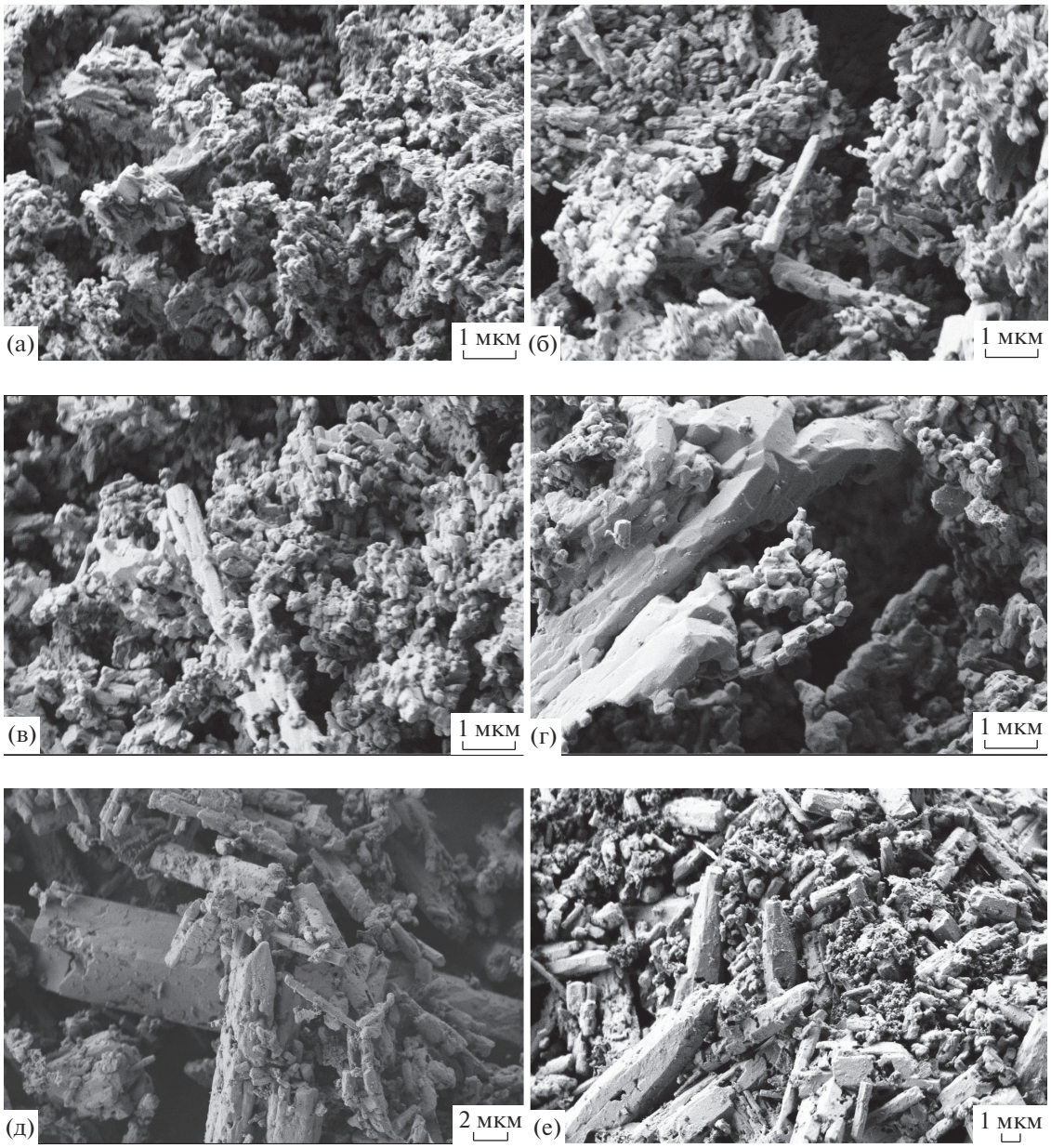

Рис. 2. Микрофотографии синтезированных образцов: а – образец 2, б – 3, в – 4, г – 5, д, е – 6 (см. табл. 1).

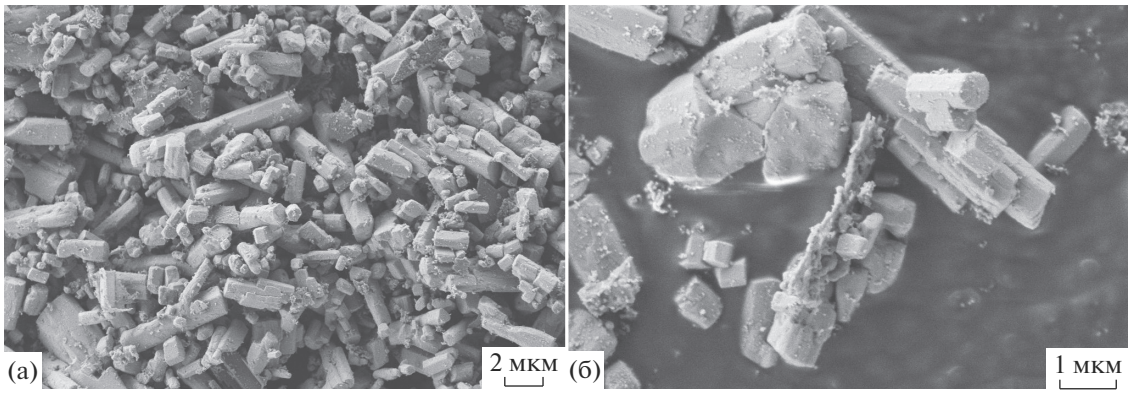

Рис. 3. Микрофотографии образца 7.

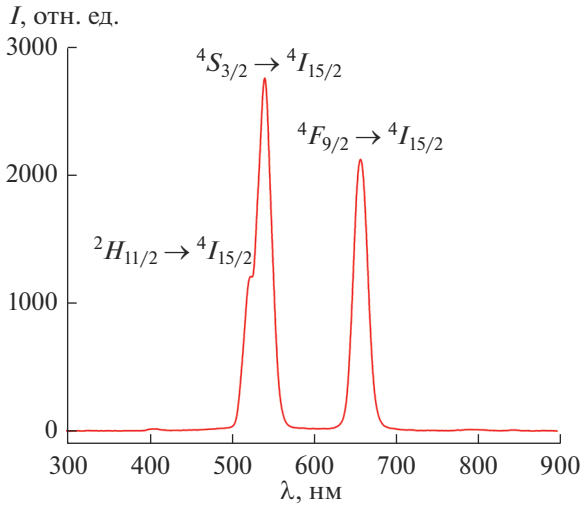

Рис. 4. Спектр люминесценции образца 7.

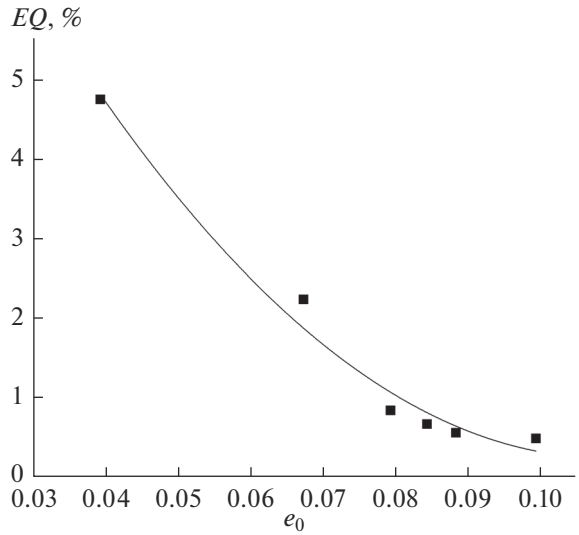

Рис. 5. Зависимость энергетического выхода люминесценции образцов 2–7 от величины микродеформаций (линия является ориентировочной).

величина микродеформаций растет на первой стадии формирования гексагональных призм, потом начинает уменьшаться на стадии изживания дефектов [56]. Вместе с этим возрастает и световыход люминесценции (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имеется много работ, направленных на выявление факторов, позволяющих улучшить характеристики ап-конверсионных люминофоров (см., например, [34, 35, 41]). Полученные в данной работе результаты указывают на новый аспект управления свойствами таких функциональных материалов, а именно: уменьшение дефектности частиц порошков способствует увеличению эффективности ап-конверсионной люминесценции.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 18-29-12050-мк.

Исследования проводились на оборудовании ЦКП ИОФРАН и ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Федоров П.П., Соболев Б.П., Белов С.Ф.* Изучение диаграммы плавкости системы $NaF–YF_3$ и разреза $Na_{0.4}Y_{0.6}F_{2.2}–YOF$ // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. 1979. Т. 15. № 5. С. 816–819.
2. *Федоров П.П.* Системы из фторидов щелочных и редкоземельных элементов // Журн. неорган. химии. 1999. Т. 44. № 11. С. 1792–1818.
3. *Fedorov P.P., Kuznetsov S.V., Osiko V.V.* Elaboration of Nanofluorides and Ceramics for Optical and Laser Applications // Photonic & Electronic Properties of Fluoride Materials / Ed. Tressaud A., Poeppelmeier K. Elsevier, 2016. (ISBN: 9780128016398). 513 p.
4. *Haase M., Schafer H.* Upconverting Nanoparticles // Angew. Chem. 2011. V. 50. № 26. P. 5808–5829.
5. *Fedorov P.P., Mayakova M.N., Voronov V.V., Baranchikov A.E., Ivanov V.K.* Preparation of "$NaRF_4$" Phases from the Sodium Nitrate Melt // J. Fluor. Chem. 2019. V. 218. P. 69–75.
6. *Bard A.B., Zhou X., Xia X., Zhu G., Lim M.B., Kim S.M., Johnson M.C., Kollman J.M., Marcus M.A., Spurgeon S.R., Perea D.E., Devaraj A., Chun J., De Yoreo J.J., Pauzauskie P.J.* A Mechanistic Understanding of Nonclassical Crystal Growth in Hydrothermally Synthesized Sodium Yttrium Fluoride Nanowires // Chem. Mater. 2020. V. 32. P. 2753–2763.
7. *Liao H., Ye S., Shi Y., Wang D.* Optical-Magnetic Bifunctional Sub-20 nm β-$NaYF_4$:Yb^{3+}/Er^{3+}@$NaGdF_4$::Yb^{3+}/Nd^{3+}@$NaGdF_4$ Core-Shell-Shell Nanoparticles Triggered by 808 nm Light // Opt. Mater. 2019. V. 98. 109489.
8. *Li L., Qin F., Zhou Y., Zheng Y., Zhao H., Zhang Z.* Study on the Thermal Sensitivity of β-$NaYF_4$:Yb^{3+}-Er^{3+} Nano-Thermometers Based on Luminescence Ratiometric Technology // Curr. Appl. Phys. 2019. V. 19. P. 480–485.
9. *Li Y., Chen B., Tong L., Zhang X., Xu S., Li X., Zhang J., Sun J., Wang X., Zhang Y., Sui G., Zhang Y., Zhang X., Xia H.* A Temperature Self-Monitoring $NaYF_4$:Dy^{3+}/Yb^{3+}@$NaYF_4$:Er^{3+}/Yb^{3+} Coreshell Photothermal Converter for Photothermal Therapy Application // Results Phys. 2019. V. 15. 102704.
10. *Cui Y., Meng Q., Lu S., Sun W.* Temperature Sensing Properties base on Up-Conversion Luminescence for $NaYF_4$:Er^{3+},Yb^{3+} Phosphor // Chem. Select. 2019. V. 4. P. 4316–4323.
11. *Takamori D.Y., Alves R.T., Gouviea-Neto A.S., Bueno L.A., Manzani D., Molina C., Martins T.S.* Synthesis and Luminescence Investigation of SBA-15/$NaYF_4$:Yb/Er Composites // J. Sol-Gel Sci. Technol. 2021. V. 97. P. 167–177.

12. *Kaiser M., Wurth C., Kraft M., Soukka T., Resch-Genger U.* Explaining the Influence of Dopant Concentration and Excitation Power Density on the Luminescence and Brightness of β-$NaYF_4$:Yb^{3+},Er^{3+} Nanoparticles: Measurements and Simulations // Nano Res. 2019. V. 12. P. 1871–1879.

13. *Palo E., Zhang H., Lastusaari M., Salomaki M.* Nanometer-Thick Ion-Selective Polyelectrolyte Multilayer Coatings to Inhibit the Disintegration of Inorganic Upconverting Nanoparticles // ACS Appl. Nano Mater. 2020. V. 3. № 7. P. 6892–6898.

14. *Antoniadou M., Pilch-Wrobel A., Riziotis C., Bernarkiewicz A., Tanasa E., Krasia-Chistoforou T.* Fluorescent Electrospun PMMA Microfiber Mats with Embedded $NaYF_4$:Yb/Er Upconverting Nanoparticles // Methods Appl. Fluoresc. 2019. V. 7. 034002.

15. *Zhang L., Zhang X., Tian L., Luo Y., Gong J., Liu R.* Hexagonal Phase β-$NaYF_4$:Yb/Er Films Made by Electrodepositing onto β-$NaGdF_4$ Underlayer at Low Temperature // J. Electrochem. Soc. 2019. V. 166. № 6. P. D168–D172.

16. *Liang D., Song Q., Yao Y., Liu B.* Preparation of Complex Nanogel with Up-conversion Fluorescence-Responsive Performance and Its Fluorescence Energy Transfer Behavior // Chem. J. Chin. Univ. 2019. V. 40. № 3. P. 583–591.

17. *Palo E., Salomaki M., Lastusaari M.* Restraining Fluoride Loss from $NaYF_4$:Yb^{3+},Er^{3+} Upconverting Nanoparticles in Aqueous Environments Using Crosslinked Poly(acrylic acid)/poly(allylamine hydrochloride) Multilayers // J. Colloid Interface Sci. 2019. V. 538. P. 320–326.

18. *Gupta S.K., Mao Y.* Recent Developments on Molten Salt Synthesis of Inorganic Nanomaterials: A Review // J. Phys. Chem. C. 2021. V. 125. P. 6508–6533.

19. *Martin M.N., Newman T., Zhang M., Sun L.D., Yan C.H., Liu G.Y., Augustine M.P.* Using NMR Relaxometry to Probe Yb^{3+}–Er^{3+} Interactions in Highly Doped Nanocrystalline $NaYF_4$ Nanostructures // J. Phys. Chem. C. 2019. V. 123. P. 10–16.

20. *Krajnik B., Golacki L.W., Kostiv U., Horak D., Podhorodecki A.* Single-Nanocrystal Studies on the Homogeneity of the Optical Properties of $NaYF_4$:Yb^{3+},Er^{3+} // ACS Omega. 2020. V. 5. P. 26537–26544.

21. *Som S., Yang. C.-Y., Lu C.-H., Das S.* Synthesis of Li^+-Ion Activated $NaYF_4$:Er^{3+}/Yb^{3+} Phosphors via a Modified Solid-State Process for Latent Fingerprint Detection // Ceram. Int. 2019. V. 45. № 5. P. 5703–5709.

22. *Cai W., Zhang Z., Jin Y., Lv Y., Wang L., Chen K., Zhou X.* Application of TiO_2 Hollow Microspheres Incorporated with Up-Conversion $NaYF_4$:Yb^{3+},Er^{3+} Nanoparticles and Commercial Available Carbon Counter Electrodes in Dye-Sensitized Solar Cells // Solar Enegry. 2019. V. 188. P. 441–449.

23. *Calabro R.L., Karna P., Kim D.Y., Yang D.S.* Controlled Synthesis and Characterization of $NaYF_4$:Yb/Er Upconverting Nanoparticles Produced by Laser Ablation in Liquid // J. Chem. Phys. 2020. V. 153. 064701.

24. *Ding M., Xi J., Yin S., Ji Z.* Molten Salt Synthesis, Growth Mechanism of β-$NaYF_4$ and Tunable Luminescence Properties of β-$NaYF_4$:Tb^{3+} Microrods // Superlattices Microstruct. 2015. V. 83. P. 390–400.

25. *Dung Cao T.M., Giang Le T.T., Nhung Nguyen T.P., Nguyet Dau T.A., Thon Nguyen V., Van Tran T.T.* Investigating the Effect of Yb^{3+} and Er^{3+} Concentration on Red/Green Luminescent Ratio in β-$NaYF_4$:Er,Yb Nanocrystals Using Spectroscopic Techniques // J. Mol. Struct. 2020. V. 1210. 128014.

26. *Dutta J., Rai V.K.* APTES Modified GO-PEI-Er^{3+}/Yb^{3+}:$NaYF_4$ Upconverting Nanoparticles Hybrid Film-Based Optical pH Sensor and NIR Photoelectric Response // IEEE Sens. J. 2019. V. 19. № 10. P. 3609–3615.

27. *Mazierski P., Roy J.K., Mikolajczyk A., Wyrzykowska E., Grzyb T., Caicedo P.N.A., Wei Z., Kowalska E., Zaleska-Medynska A., Nadolna J.* Systematic and detailed examination of $NaYF_4$-Er-Yb-TiO_2 Photocatalytic Activity under Vis–NIR Irradiation: Experimental and Theoretical Analyses // Appl. Surf. Sci. 2021. V. 536. 147805.

28. *Lin H., Xu D., Cheng Z., Li Y., Xu L., Ma Y., Yang S., Zhang Y.* Small-Sized Red-Emitting Core/Shell/Shell Nanoparticles through an Efficient Energy Back Transfer Process // Appl. Surf. Sci. 2020. V. 514. 146074.

29. *Meng J., Zhang Z., Zhang B., Gao Y., Li G., Fu Z., Zheng H.* Preparation and Spectroscopic Study of a Water-Soluble $NaYF_4$:Yb^{3+}/Er^{3+}@$NaGdF_4$ Crystal Particle and Its Application in Bioimaging // New J. Chem. 2019. V. 43. P. 1770–1774.

30. *Phuong H.T., Huong T.T., Vinh L.T., Khuyen H.T., Thao D.T., Huong N.T., Lien P.T., Minh L.Q.* Synthesis and Characterization of $NaYF_4$:Yb^{3+},Er^{3+}@silica-N=folic Acid Nanocomplex for Bioimaginable Detecting MCF-7 Breast Cancer Cells // J. Rare Earths. 2019. V. 37. P. 1183–1187.

31. *Pornpatdetaudom T., Serivalsatit K.* Effect of Molten Salts on Synthesis and Upconversion Luminescence of Ytterbium and Thulium-Doped Alkaline Yttrium Fluorides // Key Eng. Mater. 2018. V. 776. P. 34–39.

32. *Miandashti A.R., Khorashad L.K., Govorov A.O., Kordesch M.E., Richardson H.H.* Time-Resolved Temperature-Jump Measurements and Theoretical Simulations of Nanoscale Heat Transfer Using $NaYF_4$:Yb^{3+}:Er^{3+} Upconverting Nanoparticles // J. Phys. Chem. C. 2019. V. 123. P. 3770–3780.

33. *Runowski M., Stopikowska N., Szeremeta D., Goderski S., Skwierczynska M., Lis S.* Upconverting Lanthanide Fluoride Core@Shell Nanorods for Luminescent Thermometry in the First and Second Biological Windows: β-$NaYF_4$:Yb^{3+}–Er^{3+}@SiO_2 Temperature Sensor // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2019. V. 11. P. 13389–13396.

34. *Сагайдачная Е.А., Конюхова Ю.Г., Казадаева Н.И., Доронкина А.А., Янина И.Ю., Скапцов А.А., Правдин А.Б., Кочубей В.И.* Влияние методики гидротермального синтеза на интенсивность ап-конверсионной люминесценции субмикронных частиц β-$NaYF_4$:Er^{3+},Yb^{3+} // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 2. С. 109–113.

35. *Wang Y., Lu W., Yue D., Wang M., Tian B., Li Q., Hu B., Wang Z., Zhang Y.* A Strategy to Enhance the Up-Conversion Luminescence of Nanospherical, Rod-Like and Tube-Like $NaYF_4$:Yb^{3+},Er^{3+} (Tm^{3+}) through Combining Carbon Dots // CrystEngComm. 2021. V. 23. P. 935–943.

36. *Wawrzynczyk D., Cichy B., Zareba J.K., Bazylinksa U.* On the Interaction between up-Converting $NaYF_4:Er^{3+},Yb^{3+}$ Nanoparticles and Rose Bengal Molecules Constrained within the Double Core of Multifunctional Nanocarriers // J. Mater. Chem. C. 2019. V. 7. 15021.

37. *Xiao P., Ye S., Liao H., Shi Y., Wang D.* Extended Color Tunability and Efficient White-Light Generation through the Construction of β-$NaYF_4$: $Yb^{3+}/Tm^{3+}/Ho^{3+}@NaYF_4$ Core-Shell Structured Nanocrystals // J. Solid State Chem. 2019. V. 275. P. 63–69.

38. *Zhang H., Ye J., Wang X., Zhao S., Lei R., Huang L., Xu S.* Highly Reliable All-Fiber Temperature Sensor Based on the Fluorescence Intensity Ratio (FIR) Technique in Er^{3+}/Yb^{3+} co-Doped $NaYF_4$ Phosphors // J. Mater. Chem. C. 2019. V. 7. 15269.

39. *Zhang J., Wang Q., Song G., Liang H., Zhang Z.* The Effect of Surroundings on the Nonradiative Relaxation Coefficient of Yb^{3+} and Er^{3+} Ions // Appl. Phys. Express. 2019. V. 12. 055003.

40. *Zhang H., Yang Z., Wang Y., Ma Y., Qiu J., Song Z.* Near Infrared Light-Induced Photocurrent in $NaYF_4$: $:Yb^{3+},Er^{3+}/WO_{2.72}$ Composite Film // J. Am. Ceram. Soc. 2019. V. 103. № 3. P. 1677–1684.

41. *Fan S., Gao G., Sun S., Fan S., Sun H., Hu L.* Absolute up-Conversion Quantum Efficiency Reaching 4% in β-$NaYF_4:Yb^{3+},Er^{3+}$ Micro-Cylinders Achieved by Li^+/Na^+ Ion-Exchange // J. Mater. Chem. C. 2018. V. 6. P. 5453–5461.

42. *Huang X., Hu G., Xu Q., Li X., Yu Q.* Molten-Salt Synthesis and Upconversion of Hexagonal $NaYF_4:Er^{3+}$: $:Yb^{3+}$ Micro-/Nano-Crystals // J. Alloys Compd. 2014. V. 616. P. 652–661.

43. *Shi Z., Duan Y., Zhu X., Wang Q., Li D., Hu K., Feng W., Li F., Xu C.* Dual Functional $NaYF_4:Yb^{3+}$, $Er^{3+}@NaYF_4:Yb^{3+},Nd^{3+}$ Core-Shell Nanoparticles for Cell Temperature Sensing and Imaging // Nanotechnology. 2018. V. 29. № 9. 094001.

44. *Gong G., Xie S., Song Y., Tan H., Xu J., Zhang C., Xu L.* Synthesis of Lanthanide-Ion-Doped $NaYF_4$ RGB Up-Conversion Nanoparticles for Anti-Counterfeiting Application // J. Nanosci. Nanotech. 2018. V. 18. P. 8207–8215.

45. *Zhang Y., Xu S., Li X., Zhang J., Sun J., Tong L., Zhong H., Xia H., Hua R., Chen B.* Improved LRET-Based Detection Characters of Cu^{2+} Using Sandwich Structured $NaYF_4@NaYF_4:Er^{3+}/Yb^{3+}@NaYF_4$ Nanoparticles as Energy Donor // Sens. Actuators B: Chem. 2018. V. 257. P. 829–838.

46. *Mai H.-X., Zhang Y.-W., Sun L.-D., Yan C.-H.* Size- and Phase-Controlled Synthesis of Monodisperse $NaYF_4$:Yb,Er Nanocrystals from a Unique Delayed Nucleation Pathway Monitored with Upconversion Spectroscopy // J. Phys. Chem. C. 2007. V. 111. P. 13730–13739.

47. *Fedorov P.P.* Comment on "A Mechanistic Inderstanding of Non-Classical Crystal Growth in Hydrothermally Synthezied Sodium Yttrium Fluoride Nanowires" // Chem. Mater. 2021. V. 33. № 10. P. 3859–3861.

48. *Ivanov V.K., Fedorov P.P., Baranchikov A.Y., Osiko V.V.* Oriented Aggregation of Particles: 100 Years of Investigations of Non-Classical Crystal Growth // Russ. Chem. Rev. 2014. V. 83. P. 1204–1222.

49. *De Yoreo J.J., Gilbert P.U.P.A., Sommerdijk N.A.J.M., Lee Penn R., Whitelam S., Joester D., Zhang H., Rimer J.D., Navrotsky A., Banfield J.F., Wallace A.F., Marc Michel F., Meldrum F.C., Colfen H., Dove P.M.* Crystallization by Particle Attachment in Synthetic, Biogenic, and Geologic Environments // Science. 2015. V. 349. № 6247. aaa6760.

50. *Zhou W.* Reversed Crystal Growth // Crystals. 2019. V. 9. № 7.

51. *Fedorov P., Mayakova M., Alexandrov A., Voronov V., Kuznetsov S., Baranchikov A., Ivanov V.* The Melt of Sodium Nitrate as a Medium for the Synthesis of Fluorides // Inorganics.2018. V. 6. P. 38.

52. *Fedorov P.P., Alexandrov A.A.* Synthesis of Inorganic Fluorides in Molten Salt Fluxes and Ionic Liquid Mediums // J. Fluorine Chem. 2019. V. 227. 109374. https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2019.109374

53. *Fedorov P.P., Mayakova M.N., Alexandrov A.A., Voronov V.V., Pominova D.V., Chernova E.V., Ivanov V.K.* Synthesis of $NaYF_4$:Yb,Er up-Conversion Luminophore from Nitrate Flux // Nanosyst.: Phys., Chem., Math. 2020. V. 11. № 4. P. 417–423.

54. *Александров А.А.* Синтез и исследование ап-конверсионных свойств $NaYF_4$:Yb,Er // Химия: Материалы 59-й Междунар. науч. студ. конф. (12–23 апреля 2021 г.). Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2021. 212 с.

55. *Федоров П.П., Осико В.В.* Связь огранения кристаллов с механизмом их образования // ДАН. 2019. Т. 488. № 3. С. 253–255.

56. *Федоров П.П., Иванов В.К., Осико В.В.* Основные закономерности и сценарии роста кристаллов по механизму ориентированного сращивания наночастиц // ДАН. 2015. Т.465. № 3. С. 290–292.