

РЕНТГЕНОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$ ДЛЯ ФОТОНИКИ

© 2018 С. В. Кузнецов¹, В. С. Седов¹, А. К. Мартыанов¹, В. Ю. Пройдакова¹, В. Г. Ральченко¹, С. Х. Батыгов¹, В. В. Воронов¹, А. Д. Япрынцев², В. К. Иванов², П. П. Федоров¹

¹Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, ул. Вавилова, 38, 119991 Москва, Россия

²Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Ленинский пр., 31, 119991 Москва, Россия
e-mail: ppfedorov@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.07.2018

Аннотация. Разработаны люминесцентные алмазные композиты с интегрированными наночастицами $\beta\text{-NaGdF}_4:\text{Eu}$, обладающие высокоинтенсивной узкополосной рентгенолюминесценцией на длине волны 612 нм. Отмечена концентрационная зависимость интенсивности рентгенолюминесценции от содержания частиц. Использование нанопорошков $\beta\text{-NaGdF}_4:\text{Eu}$ позволило получить интенсивную рентгенолюминесценцию с более высоким соотношением сигнал/шум, нежели было достигнуто ранее.

Ключевые слова: фторид натрия-гадолиния, поликристаллический алмаз, рентгенолюминесцентные композиты.

DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2018.20/579>

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдается стремительный рост интереса к созданию композитных углеродных материалов, которые обладают улучшенными физико-химическими характеристиками. К ним относятся нанокристаллическая и нанофибриллярная целлюлоза с наночастицами [1–3] и пленки поликристаллических алмазов с наночастицами [4, 5]. Композиты на основе целлюлозы исследуются широко, в то время как композиты на основе алмаза остаются практически неисследованными, несмотря на широкий круг перспективных применений в качестве биометок (bio-labeling) [6] и люминесцентных экранов [7, 8]. Переход к композитным алмазным материалам обусловлен тем, что созданные к настоящему времени люминесцентные алмазы основаны на небольшом количестве типов оптических центров: азот-вакансия (NV) [9], кремний-вакансия (SiV) [10], германий-вакансия (GeV) [11, 12], хром- или никель-вакансия [13]. Для расширения спектрального диапазона люминесценции были предприняты успешные попытки внедрения оксида [3] и фторида [4] европия в поликристаллический алмаз. Это позволяет применять хорошо известные спектрально-люминесцентные

характеристики редкоземельных ионов для прогнозирования люминесценции требуемого спектрального диапазона. Несмотря на продемонстрированный успех [3, 4], соотношение сигнал/шум в таких материалах было низким. Использование европия неслучайно, т.к. для него определены характерные полосы поглощения и люминесценции, ответственные за различные валентные состояния: 2+ и 3+, а также определены группы симметрии для различных электронных переходов. Для увеличения интенсивности люминесценции более перспективным представляется использование не индивидуальных соединений, а легированных матриц, позволяющих эффективно преобразовывать энергию накачки. Наиболее исследуемыми люминесцентными фторидными матрицами являются низкотемпературные модификации NaGdF_4 и NaYF_4 с гексагональной структурой [14, 15] (высокотемпературные модификации с кубической флюоритовой структурой обладают в разы меньшими величинами квантового выхода люминесценции).

Существуют различные способы синтеза NaRF_4 (R – редкоземельные элементы): соосаждение из водных растворов [16], гидро- и сольвотермальные способы синтеза [17]. Явным преимущест-

вом безводных методов синтеза является возможность получения порошков фторидов, не содержащих гидроксил-ионы в кристаллической структуре. Анализ литературы показал, что NaGdF_4 является оптимальной матрицей, т.к. имеет сопоставимый с NaYF_4 квантовый выход люминесценции, синтезируется при более низких температурах и более склонен к образованию гексагональной модификации. Целью представленной работы являлось получение композитов на основе алмаз- $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$ и изучение их люминесцентных характеристик.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходных веществ использовали ацетаты гадолиния (4-водный) и европия (3-водный) марки «99.99» производства ООО «ЛАНХИТ», олеиновую кислоту марки ч. производства ВЕКТОН, 1-октадецен марки ч. производства ВЕКТОН, гидроксид натрия марки х.ч. производства Химмед, фторид аммония марки ч. производства ХИММЕД, метанол марки ос.ч. производства Химмед, хлороформ марки х.ч. производства Химмед, 96 % технический этанол.

Наночастицы $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$ (5 мол.%) были синтезированы сольвотермальным способом в высококипящих жидкостях. В трехгорлую колбу объемом 250 мл с обратным холодильником помещали ацетаты гадолиния и европия, олеиновую кислоту и ок-

тадецен-1. Реакционную смесь нагревали до 130°C в атмосфере аргона при перемешивании до полного растворения исходных реагентов, далее удаляли воду и уксусную кислоту в вакууме. Затем охлаждали реакцию смесь до комнатной температуры и добавляли к ней растворы NaOH и NH_4F в метаноле. Реакционную смесь нагревали до температуры $50\text{--}60^\circ\text{C}$ и выдерживали в течение одного часа, затем нагревали до 290°C , выдерживали в течение 1.5 часов и охлаждали до комнатной температуры. Осадок наночастиц получали центрифугированием (Eppendorf 5804, 6500 об/мин, 5 минут). Полученные наночастицы трижды последовательно диспергировали в хлороформе, затем в спирте. Рентгенофазовый анализ был проведен на дифрактометре Bruker D8 Advance с $\text{CuK}\alpha$ -излучением. Расчет параметров решетки проводили в программе Powder 2.0. На рис. 1 представлена типичная рентгенограмма полученных порошков. Дополнительных пиков не обнаружено, что свидетельствует о получении однофазного твердого раствора $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$. Были рассчитаны параметры решетки: $a = 6.040(2)$, $c = 3.596(2)$ Å, которые близки данным карточки JCPDS 27-0699 для низкотемпературной модификации $\beta\text{-NaGdF}_4$ ($a = 6.020$, $c = 3.601$ Å). Отклонение параметров решетки связано с образованием твердого раствора $\text{NaGd}_{0.95}\text{Eu}_{0.05}\text{F}_4$. Кристаллический радиус гадолиния (1.193 Å) меньше, чем у европия (1.206 Å) [18], в связи с чем увеличение па-

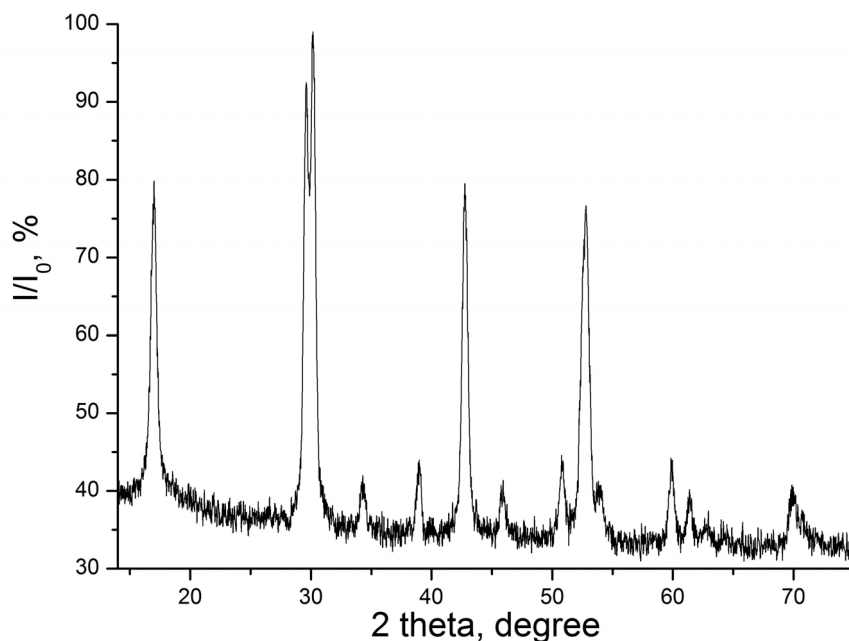


Рис. 1. Рентгенограмма образца $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$
[Fig. 1. XRD patterns of $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$ samples]

раметра решетки (a) при легировании европием вполне естественно. Морфология и размер частиц были оценены методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Carl Zeiss NVision 40. Средний размер сферических частиц составлял около 31 нм (рис. 2).

Полученные частицы $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$ были диспергированы посредством ультразвука в диметилсульфоксиде (DMSO) в течение 30 мин для получения суспензий с концентрацией 65 и 32 мг/мл. В качестве подложек для осаждения алмазных плёнок использовали полированные пластины монокристаллического кремния (100) размером $10 \times 10 \times 1$ мм³. До нанесения $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$ подложки подвергали ультразвуковой обработке в суспензии наноалмазного порошка (размер частиц 20 нм) в DMSO с концентрацией 0.2 мг/мл, в результате чего на поверхности подложки образовывался слой алмазных зародышей с плотностью более 10^{10} частиц/см². Затем производился синтез алмазных плёнок в СВЧ плазме в плазмохимическом реакторе ARDIS-100 (2.45 ГГц, 5 кВт), в газовой смеси CH_4/H_2 при общем расходе газа 500 станд. см³/мин, давление в камере 55 Торр, и СВЧ мощности 3.4 кВт. Концентрация метана составляла 6 % от суммарного газового потока, температура подложек измерялась двухлучевым пирометром Micron M770 и поддерживалась на уровне 850 °С. Толщина всех синтезированных алмазных пленок была одинаковой и составляла 2 мкм.

На полученные алмазные плёнки наносили ранее приготовленные суспензии $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$ с концентрацией 32 мг/мл в количестве 1, 2 и 3 капли по 0.10 мл (образцы обозначены как 1, 2 и 3 соответственно) с последовательной сушкой каждой капли при температуре 120 °С в течение 15 минут в сушильном шкафу. Также была изготовлена 1 плёнка с 1 каплей суспензии с концентрацией 65 мг/мл, образец обозначен номером 4. В результате на поверхности алмазных плёнок образовывался слой с различной концентрацией частиц $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$.

На каждый образец поверх слоя частиц $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$ последовательно наносили по 2 капли по 0.10 мл суспензии наноалмазного порошка (размер частиц 50 нм, Tomei Diamond, Япония) в спирте с концентрацией 0.5 мг/мл. Затем производили повторный плазмохимический синтез алмазных плёнок из СВЧ плазмы CH_4/H_2 в течение 2.5 часов. Температура подложек во время синтеза составляла 750 °С при давлении 45 Торр и мощности 2.75 кВт. Остальные параметры синтеза алмазных покрытий оставались без изменения. Скорость роста поликри-

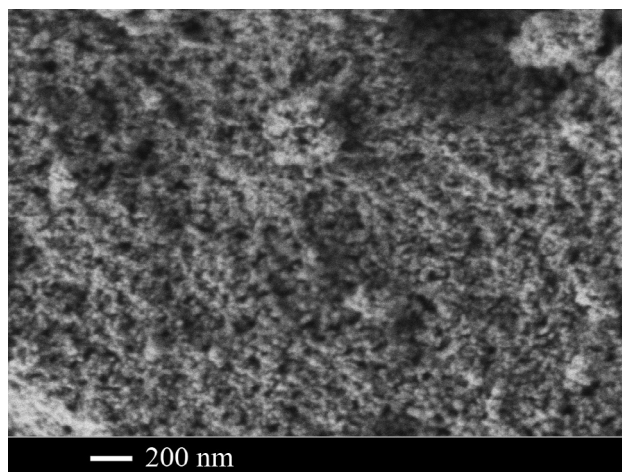


Рис. 2. Микрофотография образца $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$
[Fig. 2. SEM image of $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$ samples]

сталлического алмаза измеряли лазерной интерферометрией по методу [19], заключающимся в измерении осцилляции интенсивности отраженного от системы пленка-подложка луча полупроводникового лазера с длиной волны 532 нм, и составила ~ 1.8 мкм/ч.

В результате были получены композитные пленки, состоящие из поликристаллического алмаза с интегрированными наночастицами $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$. Спектры рентгенолюминесценции исходного порошка и пленок были получены с использованием излучения рентгеновской трубки с вольфрамовым анодом при напряжении 40 кВ и токе 35 мА. Регистрация сигнала осуществлялась миниспектрометром FSD-10. Полученные спектры показаны на рис. 3. Соотношение сигнал/шум в композитных пленках выше, чем в предшествующих работах [3, 4].

В спектре рентгенолюминесценции исходного порошка (рис. 3а, сплошная линия) присутствуют полосы люминесценции, соответствующие переходам ${}^5\text{D}_1 - {}^7\text{F}_0$ (535, 556 нм), ${}^5\text{D}_0 - {}^7\text{F}_1$ (583, 591 нм), ${}^5\text{D}_0 - {}^7\text{F}_2$ (616, 626 нм) и ${}^5\text{D}_0 - {}^7\text{F}_4$ (694 нм). Присутствие переходов с ${}^5\text{D}_1$ обусловлено сравнительно низкой скоростью безызлучательной релаксации с ${}^5\text{D}_1$ на ${}^5\text{D}_0$, что может быть связано с низкой энергией фононов в NaGdF_4 . В спектрах люминесценции пленок (рис. 3, пунктирная линия) отсутствуют переходы с ${}^5\text{D}_1$ и переходы ${}^5\text{D}_0 - {}^7\text{F}_4$, кроме того изменилось соотношение интенсивностей линий между переходами ${}^5\text{D}_0 - {}^7\text{F}_1$ и ${}^5\text{D}_0 - {}^7\text{F}_2$. В пленке интенсивность вынужденного электрического дипольного перехода ${}^5\text{D}_0 - {}^7\text{F}_2$ по отношению к интенсивности магнитного дипольного перехода ${}^5\text{D}_0 - {}^7\text{F}_1$ значительно больше, чем в исходном порошке, что указывает на понижение локальной симметрии окружения ионов Eu^{3+} при

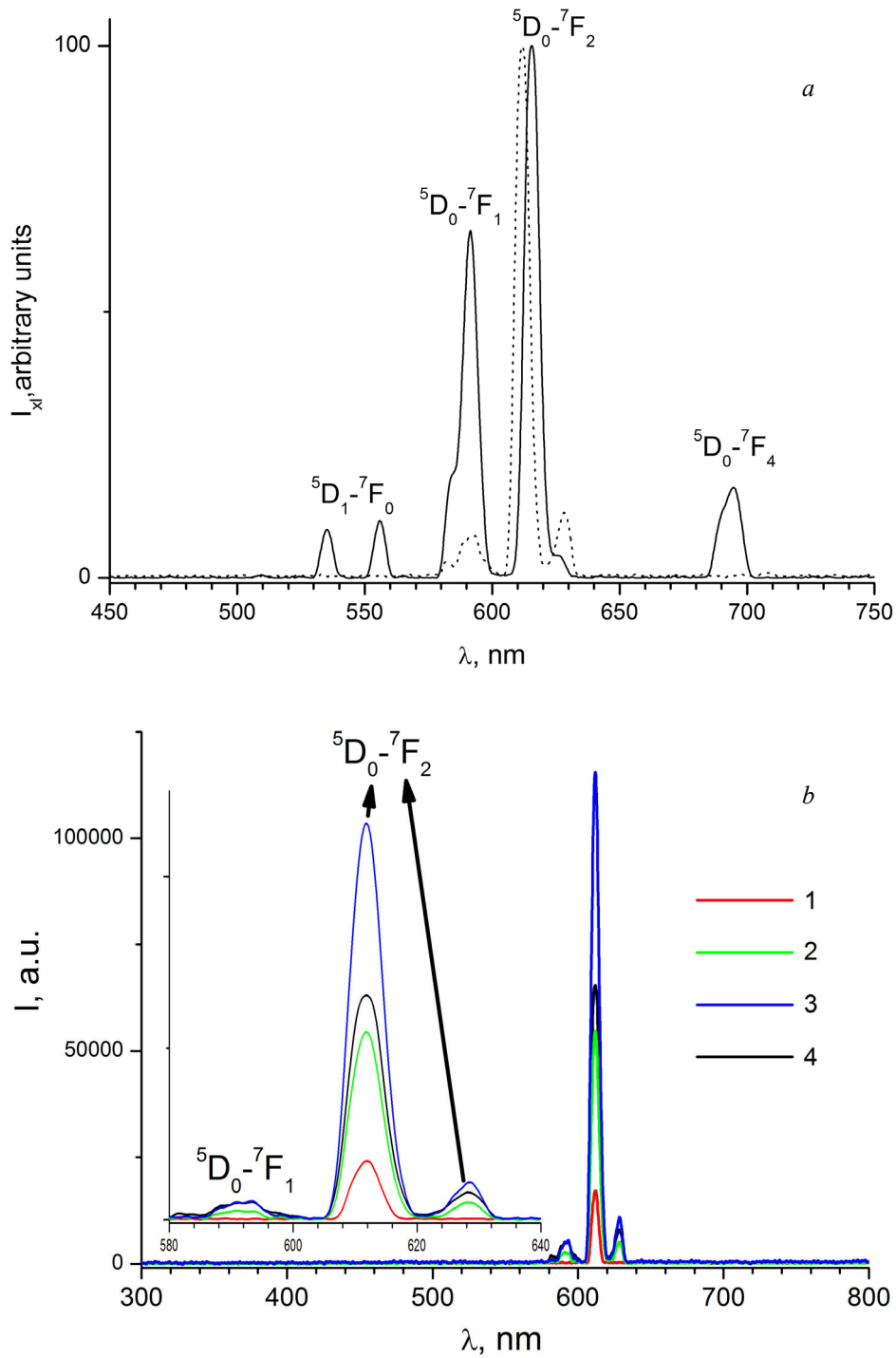


Рис. 3. Спектры рентгенолюминесценции: *a*) исходного порошка $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$ (сплошная линия) и порошка $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$ в алмазной пленке (пунктирная линия – образец № 3); *b*) пленок с различной суммарной концентрацией дисперсий (1 – 1 капля дисперсии 32 мг/мл, 2 – 2 капли дисперсии 32 мг/мл, 3 – 3 капли дисперсии 32 мг/мл, 4 – 1 капля дисперсии 65 мг/мл)

[Fig. 3. X-ray luminescence spectra: *a*) initial powder $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$ (solid line) and $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$ powder in a diamond film (dotted line, sample 3); *b*) films with different total concentration of dispersions (1 – 1 drop of dispersion 32 mg/ml, 2 – 2 drops of dispersion 32 mg/ml, 3 – 3 drops of dispersion 32 mg/ml, 4 – 1 drop of dispersion 65 mg/ml)]

осаждении пленки. Кроме того, в пленке заметно изменились положения и интенсивности отдельных линий в переходе ${}^5D_0-{}^7F_2$, в частности, наиболее интенсивная линия этого перехода сместилась с 616 до 612 нм, что также указывает на изменение структуры $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$ при осаждении пленки. На рис. 3b представлены спектры рентгенолюминесценции пленок с различным количеством нанесенных капель дисперсии. Наиболее интенсивной люминесценцией обладает образец, приготовленный с использованием трех капель дисперсии с суммарной концентрацией нанесенных частиц 96 мг/мл. Образец с суммарной концентрацией 65 мг/мл (1 капля дисперсии) немного превосходит по интенсивности образец с суммарной концентрацией 64 мг/мл (2 капли дисперсии). Наименьшая интенсивность зафиксирована для образца с суммарной концентрацией 32 мг/мл (1 капля дисперсии). Таким образом, наблюдается концентрационная зависимость интенсивности рентгенолюминесценции от количества нанесенной дисперсии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны люминесцентные алмазные композиты, обладающие высокоинтенсивной узкополосной люминесценцией на длине волны 612 нм с шириной пика на полувысоте 6.2 нм. Отмечена концентрационная зависимость интенсивности рентгенолюминесценции от количества нанесенных частиц дисперсий. Использование нанопорошков $\beta\text{-NaGdF}_4:\text{Eu}$ вместо оксида европия [3] и фторида европия [4] позволило получить высокоинтенсивную люминесценцию с более высоким соотношением сигнал/шум, чем в предшествующих работах [3, 4]. Впервые показана возможность применения люминесцентного композита алмаз-фторид в качестве люминесцентных рентгеновских экранов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-29-11784-офи.

Результаты получены с использованием оборудования центров коллективного пользования ИОФ РАН и ИОНХ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Golmohammadi H., Morales-Narváez E., Naghdi T., Merkoçi A. // *Chem. Mater.*, 2017, vol. 29, pp. 5426–5446. DOI: 10.1021/acs.chemmater.7b01170
2. Fedorov P. P., Luginina A. A., Kuznetsov S. V., Voronov V. V., Lyapin A. A., Ryabochkina P. A., Chernov M. V., Mayakova M. N., Pominova D. V., Uvarov O. V., Baranchikov A. E., Ivanov V. K., Pynenkov A. A., Nishchev K. N. // *J. Fluor. Chem.*, 2017, vol. 202, pp. 9–18. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2017.08.012
3. Miao M., Zhao J., Feng X., Cao Y., Cao S., Zhao Y., Ge X., Sun L., Shi L., Fang J. // *J. Mater. Chem.*, 2015, vol. C 3, pp. 2511–2517. DOI: 10.1039/c4tc02622e
4. Magyar A., Hu W., Shanley T., et al. // *Nature Comm.*, 2014, vol. 5, Article number: 3523, DOI: 10.1038/ncomms4523
5. Sedov V. S., Kuznetsov S. V., Ralchenko V. G., Mayakova M. N., Krivobok V. S., Savin S. S., Martyanov A. K., Romanishkin I. D., Khomich A. A., Fedorov P. P., Konov V. I. // *Diam. Relat. Mater.*, 2017, vol. 72, pp. 47–52. DOI: 10.1016/j.diamond.2016.12.022
6. Bokarev A. N., Plastun I. L. // *Nanosystems: Phys., Chem., Math.*, 2018, vol. 9 (3), pp. 370–377. DOI: 10.17586/2220-8054-2018-9-3-370-377
7. Kudo T., Takahashi S., Nariyama N., Hirono T., Tachibana T., Kitamura H. // *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, vol. 77, pp. 123105. DOI: 10.1063/1.2403843
8. Degenhardt M., Aprigliano G., Schulte-Schrepping H., Hahn U., Grabosch H.-J., Wörner E. // *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2013, vol. 425, pp. 192022. DOI: 10.1088/1742-6596/425/19/192022
9. Schirhagl R., Chang K., Loretz M., Degen C. L. // *Ann. Rev. Phys. Chem.*, 2014, vol. 65, pp. 83–105. DOI: 10.1146/annurev-physchem-040513-103659
10. Bolshakov A., Ralchenko V., Sedov V., et al. // *Phys. Status Solidi (a)*, 2015, vol. 212.11, pp. 2525–2532. DOI: 10.1002/pssa.201532174
11. Ralchenko V. G., Sedov V. S., Khomich A. A., Krivobok V. S., Nikolaev S. N., Savin S. S., Vlasov I. I., Konov V. I. // *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2015, vol. 42, pp. 165–168. DOI: 10.3103/s1068335615060020
12. Ekimov E. A., Lyapin S. G., Boldyrev K. N., Kondrin M. V., Khmel'nitskiy R., Gavva V. A., Kotereva T. V., Popova M. N. // *JETP Lett.*, 2015, vol. 102, pp. 701–706. DOI: 10.1134/s0021364015230034
13. Aharonovich I., Castelletto S., Johnson B. C., McCallum J. C., Simpson D. A., Greentree A. D., Praver S. // *Phys. Rev.*, 2010, vol. B 81, pp. 121201. DOI: 10.1103/physrevb.81.043813
14. Nocolak A., Podhorodecki A. // *Nanotechnology*, 2017, vol. 28, pp. 175706. DOI: 10.1088/1361-6528/aa6522
15. Palo E., Tuomisto M., Hyppänen I., Swart H. C., Hölsä J., Soukka T., Lastusaari M. // *J. Lumin.*, 2017, vol. 185, pp. 125–131. DOI: 10.1016/j.jlumin.2016.12.051
16. Yasyrkina D. S., Kuznetsov S. V., Fedorov P. P., Voronov V. V., Ermakov R. P., Ryabova A. V., Pominova D. V., Baranchikov A. E., Ivanov V. K., Osiko V. V. // *J. Fluor. Chem.*, 2014, vol. 158, pp. 60–64. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2013.11.009
17. Zhao J., Jin D., Schartner E. P., et al. // *Nature Nanotech.*, 2013, vol. 8, pp. 729–734. DOI: 10.1038/nnano.2013.171
18. Shannon R. D. // *Acta Crystallogr. A.*, 1976, vol. 32(5), pp. 751–767. DOI: 10.1107/s0567739476001551
19. Sedov V., Ralchenko V., Khomich A. A., Vlasov I., Vul A., Savin S., Goryachev A., Konov V. // *Diam. Relat.*

Mater., 2015, vol. 56, pp. 23–28. DOI: 10.1107/s0567739476001551

20. Dieke G. H., Crosswhite H. M. // *Appl. Opt.*, 1963, vol. 2, pp. 675–686. DOI: 10.1364/ao.2.000675

X-RAY LUMINESCENT COMPOSITES BASED ON POLYCRYSTALLINE DIAMOND WITH INTEGRATED NaGdF₄:Eu NANOPARTICLES FOR PHOTONICS

© 2018 S. V. Kuznetsov¹, V. S. Sedov¹, A. K. Martyanov¹, V. Yu. Proydakova¹, V. G. Ralchenko¹, S. Kh. Batygov¹, V. V. Voronov¹, A. D. Yaprntsev², V. K. Ivanov², P. P. Fedorov¹

¹*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 38 Vavilov str., 119991 Moscow, Russia*

²*Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry RAS, 31 Leninskii pr., 119991 Moscow, Russia*

e-mail: ppfedorov@yandex.ru

Received 26.07.2018

Abstract. The luminescent diamond composite with high-intensity narrow-band X-ray luminescence at a wavelength of 612 nm with 6.2 nm width at half-height was developed. In the luminescence spectra of composites, compared with the initial powders, there are no transitions with ⁵D₁ and ⁵D₀–⁷F₄ transitions. The ratio of line intensities between the ⁵D₀–⁷F₁ and ⁵D₀–⁷F₂ transitions has changed. In the composite, the intensity of the induced electric dipole transition of ⁵D₀–⁷F₂ with respect to the intensity of the magnetic dipole transition of ⁵D₀–⁷F₁ was much larger than in the initial powder. This was indicated about a decrease in the local symmetry of the Eu³⁺ ions environment in the composite. The positions and intensities of individual lines in the ⁵D₀–⁷F₂ transition had changed markedly in the composite, in particular, the most intense line of this transition has shifted from 616 to 612 nm. This was indicated as a change in the structure of NaGdF₄:Eu upon composite production. X-ray luminescence spectra of a composite with different amounts of dispersed droplets were showed that the sample with 3 droplets of dispersion with a total concentration of applied particles of 96 mg/ml was exhibited the most intense luminescence. A sample with a 65 mg/ml total concentration (1 drop of dispersion) slightly exceeds the intensity of the sample with a total concentration of 64 mg/ml (2 drops of dispersion). The lowest intensity was recorded for a sample with a 32 mg/ml total concentration (1 drop of dispersion). The concentration dependence of the intensity of X-ray luminescence from the number of dispersed particles was noted. The use of β-NaGdF₄:Eu nanopowders instead of europium oxide and europium fluoride made it possible to obtain high-intensity luminescence with a higher aspect ratio of signal-to-noise ratio than previously published by various authors. The possibility of using a fluorescent diamond-fluoride composite as a X-ray luminescent screen has been shown for the first time.

Keywords: sodium-gadolinium fluoride, polycrystalline diamond, X-ray luminescent composites.

DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2018.20/579>

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was supported by grant Russian Foundation for Basic Research No. 16-29-11784-ofi.

The results were obtained using the equipment of the Collective Use Centers of the Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences and Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences.

REFERENCES

1. Golmohammadi H., Morales-Narváez E., Naghdi T., Merkoçi A. *Chem. Mater.*, 2017, vol. 29, pp. 5426–5446. DOI: 10.1021/acs.chemmater.7b01170

2. Fedorov P. P., Luginina A. A., Kuznetsov S. V., Voronov V. V., Lyapina A. A., Ryabochkina P. A., Chernov M. V., Mayakova M. N., Pominova D. V., Uvarov O. V., Baranchikov A. E., Ivanov V. K., Pynenkov A. A., Nishchev K. N. *J. Fluor. Chem.*, 2017, vol. 202, pp. 9–18. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2017.08.012

3. Miao M., Zhao J., Feng X., Cao Y., Cao S., Zhao Y., Ge X., Sun L., Shi L., Fang J. *J. Mater. Chem.*, 2015, vol. C 3, pp. 2511–2517. DOI: 10.1039/c4tc02622e

4. Magyar A., Hu W., Shanley T., et al. *Nature Comm.*, 2014, vol. 5, Article number: 3523, DOI: 10.1038/ncomms4523

5. Sedov V. S., Kuznetsov S. V., Ralchenko V. G., Mayakova M. N., Krivobok V. S., Savin S. S., Martya-

- nov A. K., Romanishkin I. D., Khomich A. A., Fedorov P. P., Konov V. I. *Diam. Relat. Mater.*, 2017, vol. 72, pp. 47–52. DOI: 10.1016/j.diamond.2016.12.022
6. Bokarev A. N., Plastun I. L. *Nanosystems: Phys., Chem., Math.*, 2018, vol. 9 (3), pp. 370–377. DOI: 10.17586/2220-8054-2018-9-3-370-377
7. Kudo T., Takahashi S., Nariyama N., Hirono T., Tachibana T., Kitamura H. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, vol. 77, pp. 123105. DOI: 10.1063/1.2403843
8. Degenhardt M., Aprigliano G., Schulte-Schrepping H., Hahn U., Grabosch H.-J., Wörner E. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2013, vol. 425, pp. 192022. DOI: 10.1088/1742-6596/425/19/192022
9. Schirhagl R., Chang K., Loretz M., Degen C. L. *Ann. Rev. Phys. Chem.*, 2014, vol. 65, pp. 83–105. DOI: 10.1146/annurev-physchem-040513-103659
10. Bolshakov A., Ralchenko V., Sedov V., et al. *Phys. Status Solidi (a)*, 2015, vol. 212.11, pp. 2525–2532. DOI: 10.1002/pssa.201532174
11. Ralchenko V. G., Sedov V. S., Khomich A. A., Krivobok V. S., Nikolaev S. N., Savin S. S., Vlasov I. I., Konov V. I. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2015, vol. 42, pp. 165–168. DOI: 10.3103/s1068335615060020
12. Ekimov E. A., Lyapin S. G., Boldyrev K. N., Kondrin M. V., Khmel'nitskiy R., Gavva V. A., Kotereva T. V., Popova M. N. *JETP Lett.*, 2015, vol. 102, pp. 701–706. DOI: 10.1134/s0021364015230034
13. Aharonovich I., Castelletto S., Johnson B. C., McCallum J. C., Simpson D. A., Greentree A. D., Praver S. *Phys. Rev.*, 2010, vol. B 81, pp. 121201. DOI: 10.1103/physreva.81.043813
14. Noculak A., Podhorodecki A. *Nanotechnology*, 2017, vol. 28, pp. 175706. DOI: 10.1088/1361-6528/aa6522
15. Palo E., Tuomisto M., Hyppänen I., Swart H. C., Hölsä J., Soukka T., Lastusaari M. *J. Lumin.*, 2017, vol. 185, pp. 125–131. DOI: 10.1016/j.jlumin.2016.12.051
16. Yasyrkina D. S., Kuznetsov S. V., Fedorov P. P., Voronov V. V., Ermakov R. P., Ryabova A. V., Pominova D. V., Baranchikov A. E., Ivanov V. K., Osiko V. V. *J. Fluor. Chem.*, 2014, vol. 158, pp. 60–64. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2013.11.009
17. Zhao J., Jin D., Schartner E. P., et al. *Nature Nanotech.*, 2013, vol. 8, pp. 729–734. DOI: 10.1038/nnano.2013.171
18. Shannon R. D. *Acta Crystallogr. A.*, 1976, vol. 32(5), pp. 751–767. DOI: 10.1107/s0567739476001551
19. Sedov V., Ralchenko V., Khomich A. A., Vlasov I., Vul A., Savin S., Goryachev A., Konov V. *Diam. Relat. Mater.*, 2015, vol. 56, pp. 23–28. DOI: 10.1107/s0567739476001551
20. Dieke G. H., Crosswhite H. M. *Appl. Opt.*, 1963, vol. 2, pp. 675–686. DOI: 10.1364/ao.2.000675

Кузнецов Сергей Викторович – к. х. н., с. н. с., Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН; тел.: +7 (499) 5038721, e-mail: kouznetzovsv@gmail.com

Седов Вадим Станиславович – к. ф.-м. н., н. с., Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН; тел.: +7 (499) 5038781, e-mail: sedovvadim@yandex.ru

Мартьянов Артем Константинович – аспирант, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН; тел.: +7 (499) 5038781, e-mail: art.martyanov@gmail.com

Пройдакова Вера Юрьевна – н. с., Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН; тел.: +7 (499) 5038721, e-mail: vera.proydakova@gmail.com

Ральченко Виктор Григорьевич – к. ф.-м. н., заведующий лабораторией, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН; тел.: +7(499) 5038229, e-mail: vg_ralchenko@mail.ru

Батыгов Сергей Хачатурович – к. ф.-м. н., в. н. с., Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН; тел.: +7(499) 5038393, e-mail: sbat@lst.gpi.ru

Sergey V. Kuznetsov – Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher, Prokhorov General Physics Institute RAS; tel.: +7 (499) 5038721, e-mail: kouznetzovsv@gmail.com

Vadim S. Sedov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Prokhorov General Physics Institute RAS; tel.: +7 (499) 503 87-81, e-mail: sedovvadim@yandex.ru

Artem K. Martyanov – the postgraduate, Prokhorov General Physics Institute RAS; tel.: +7 (499) 503 87-81, e-mail: art.martyanov@gmail.com

Vera Yu. Proydakova - Researcher, Prokhorov General Physics Institute RAS; tel.: +7 (499) 5038721, e-mail: vera.proydakova@gmail.com

Viktor G. Ralchenko - Cand. Sci. (Phys.-Math.), Laboratory Head, Prokhorov General Physics Institute RAS; tel.: +7(499) 5038229, e-mail: vg_ralchenko@mail.ru

Sergey Kh. Batygov – Leading Researcher, Prokhorov General Physics Institute RAS; tel.: +7(499) 5038393, e-mail: sbat@lst.gpi.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**

Япрынцев Алексей Дмитриевич – аспирант, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, тел.: +7 (495) 6338534, e-mail: **yaprynsev@yandex.ru**

Иванов Владимир Константинович – д. х. н., член-корреспондент РАН, директор ИОНХ РАН, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, тел.: +7 (495) 9520224, e-mail: **van10@mail.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**

Valeriy V. Voronov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Laboratory Head, Prokhorov General Physics Institute RAS; tel.: +7 (499) 5038377, e-mail: **voronov@lst.gpi.ru**

Alexey D. Yaprynsev – the postgraduate, Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, RAS, tel.: +7 (495) 6338534, e-mail: **yaprynsev@yandex.ru**

Vladimir K. Ivanov – Dr. Sci. (Chem.), Full Professor, Director of the Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry RAS, tel.: +7 (495) 9520224, e-mail: **van10@mail.ru**

Pavel P. Fedorov – Dr. Sci. (Chem.), Full Professor, Laboratory Head, Prokhorov General Physics Institute, RAS; tel.: +7 (499) 5038292, e-mail: **ppfedorov@yandex.ru**