



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-21-28>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.357.74-022.532:669.056.91

ЗОЛЬ-ГЕЛЬ-СИНТЕЗ МОНОДИСПЕРСНЫХ ГЛОБУЛ КРЕМНЕЗЕМА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УПОРЯДОЧЕННЫХ И НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Н. В. ГАПОНЕНКО¹, С. М. КЛЕЩЕВА, Е. И. ЛАШКОВСКАЯ¹, В. А. ЛАБУНОВ¹,
И. Л. МАРТЫНОВ², А. А. ЧИСТЯКОВ², Н. И. КАРГИН², Т. Ф. РАЙЧЕНОК³,
Л. В. СУДНИК⁴, А. Р. ЛУЧЕНОК⁴, М. ВАНГ⁵

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва, Российская Федерация)

³Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси
(г. Минск, Республика Беларусь)

⁴Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа
(г. Минск, Республика Беларусь)

⁵Сианьский университет Цзяо Тун (г. Сиань, Китайская Народная Республика)

Поступила в редакцию 06.09.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Золь-гель-методом синтезированы монодисперсные глобулы кремнезема размерами около 250–300 нм, составляющие основу для синтеза искусственных опалов – трехмерных фотонных кристаллов и неупорядоченных опаловых матриц. Синтезированы матовые покрытия на кварцевом стекле, состоящие из монодисперсных глобул кремнезема и ксерогеля титаната бария, легированного эрбием и иттербием, демонстрирующие ап-конверсионную люминесценцию эрбия. Показано вызванное термообработкой изменение полосы непрозрачности (фотонной запрещенной зоны) в спектрах отражения синтетических опалов, содержащих ксерогель титаната бария и остатки не удаленного термообработкой этиленгликоля.

Ключевые слова: золь-гель-метод, искусственный опал, фотонный кристалл, ап-конверсия, люминесценция эрбия, ксерогель титаната бария.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф22КИТГ-008, № Х23М-044, № Т23РНФ-147 и задания 3.5 Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций». Авторы выражают благодарность В. Д. Живулько и Д. В. Жигулину за помощь при анализе образцов.

Для цитирования. Золь-гель-синтез монодисперсных глобул кремнезема и оптические свойства упорядоченных и неупорядоченных материалов на их основе / Н. В. Гапоненко [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 21–28. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-21-28>.

SOL-GEL SYNTHESIS OF MONODISPERSE SILICA GLOBULES AND OPTICAL PROPERTIES OF ORDERED AND DISORDERED MATERIALS BASED ON THEM

NIKOLAI V. GAPONENKO¹, SVETLANA M. KLESHCHEVA,
EKATERINA I. LASHKOVSKAYA¹, VLADIMIR A. LABUNOV¹, IGOR L. MARTYNOV²,
ALEXANDER A. CHISTYAKOV², NIKOLAI I. KARGIN², TAMARA F. RAICHENOK³,
LARISA V. SUDNIK⁴, ALEXEI R. LUCHANOK⁴, MINQIANG WANG⁵

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russian Federation)

³B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

⁴Powder Metallurgy Institute (Minsk, Republic of Belarus)

⁵Xi'an Jiaotong University (Xi'an, People's Republic of China)

Submitted 06.09.2024

Abstract. Monodisperse silica globules of about 250–300 nm in size have been synthesized by the sol-gel method. These globules form the basis for the synthesis of artificial opals – three-dimensional photonic crystals and disordered opal matrices. Matte coatings on quartz glass consisting of monodisperse silica globules and barium titanate xerogel doped with erbium and ytterbium, demonstrating up-conversion luminescence of erbium, have been synthesized. A change in the photonic band gap caused by heat treatment in the reflectance spectra of synthetic opals containing barium titanate xerogel and residues of ethylene glycol not removed by heat treatment has been shown.

Keywords: sol-gel method, artificial opal, photonic crystal, up-conversion, erbium luminescence, barium titanate xerogel.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The work was sponsored by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research Projects No F22KITG-008, No X23M-044, No T23RNF-147 and task 3.5 of the State Program of Scientific Research “Photonics and Electronics for Innovations”. The authors express their gratitude to V. D. Zhivulko and D. V. Zhigulin for assistance in analyzing the samples.

For citation. Gaponenko N. V., Kleshcheva S. M., Lashkovskaya E. I., Labunov V. A., Martynov I. L., Chistyakov A. A., et al. (2024) Sol-Gel Synthesis of Monodisperse Silica Globules and Optical Properties of Ordered and Disordered Materials Based on Them. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 21–28. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-21-28> (in Russian).

Введение

Монодисперсные глобулы кремнезема размерами около нескольких сотен нанометров синтезируются из раствора тетраэтоксисилана [1]. Глобулы кремнезема используются для получения синтетических опалов – драгоценных камней и трехмерных фотонных кристаллов, оптические свойства которых могут быть модифицированы за счет введения золь в поры и формирования в порах опалов ксерогелей при последующей термообработке, а также при введении в поры жидкостей [2–6]. Опаловые матрицы, представляющие собой упорядоченную упаковку монодисперсных глобул, используются также для формирования фотонных кристаллов с перестраиваемой фотонной запрещенной зоной и инвертированных опалов [7]. В [4, 5, 8] рассмотрена интенсивная люминесценция лантаноидов и квантовых точек, зависящая от положения фотонной запрещенной зоны (полосы непрозрачности) опалов и инвертированных опалов. Представляет дальнейший интерес исследование оптических свойств упорядоченных и неупорядоченных матриц на основе монодисперсных глобул кремнезема для их практического применения в качестве сенсоров, рассеивающих сред и люминофоров. В статье исследованы оптические спектры композитов, состоящих из монодисперсных глобул кремнезема, выполненные в виде люминесцентных покрытий, упорядоченных и неупорядоченных опаловых матриц.

Проведение эксперимента

Для работы с опаловыми матрицами использовались синтезированные ранее по методике [2] упорядоченные опаловые матрицы с фотонной запрещенной зоной в видимом диапазоне, а также синтезированные в лаборатории нанофотоники БГУИР монодисперсные глобулы и опаловые матрицы на их основе, спрессованные методом взрывного прессования [9]. Монодисперсные

глобулы использовались также для формирования суспензии с золей титаната бария, содержащим эрбий и иттербий. Для синтеза монодисперсных глобул кремнезема применялись этиловый спирт (этанол), тетраэтоксисилан (C_2H_5O)₄Si, аммиак и дистиллированная вода. Полученную смесь интенсивно перемешивали 4 ч. Затем сформированные монодисперсные глобулы смешивали с золей титаната бария и полученную суспензию наносили на кварцевое стекло с последующей термообработкой. Золь титаната бария, содержащий эрбий и иттербий, был изготовлен по методике [9]. В качестве исходных компонентов синтеза золя использовали изопропоксид титана ($Ti(OC_3H_7)_4$), ацетат бария ($Ba(CH_3COO)_2$), гидрат ацетата эрбия ($Er(CH_3COO)_3 \cdot xH_2O$), гидрат ацетата иттербия ($Yb(CH_3COO)_3 \cdot xH_2O$), ацетилацетон ($CH_3COCH_2COCH_3$) и уксусную кислоту (CH_3COOH). Золь оксида титана с европием для пропитки опаловой матрицы был получен на основе изопропоксида титана, гидрата нитрата европия ($Eu(CH_3COO)_3 \cdot xH_2O$), изопропилового спирта ($CH_3CH(OH)CH_3$) и азотной кислоты HNO_3 .

Упорядоченные опаловые матрицы использовались для пропитки этиленгликолем с последующим нагревом и регистрации спектров отражения при нагреве. Опаловые матрицы, синтезированные взрывным прессованием, использовались для анализа спектров отражения при комнатной температуре, пропитки золей, содержащих европий, и возбуждения люминесценции европия. Суспензию из монодисперсных глобул и золя титаната бария наносили на кварцевое стекло методом центрифугирования со скоростью 2200 об/мин с последующей термообработкой при температуре 900 °C в течение 30 мин.

Ап-конверсионную люминесценцию возбуждали непрерывным лазерным излучением с длиной волны возбуждения 980 нм [9]. Люминесценция европия регистрировалась на спектрофлуориметре CM 2203 (Solar, Беларусь). Морфология полученных образцов исследовалась на растровом электронном микроскопе (РЭМ) S-4800 (Hitachi, Япония). Спектры отражения и пропускания измерялись на спектрофотометрах Cary-500 Scan UV-VIS NIR (Varian, США-Австралия) и MC 122 (ООО «СОЛ Инструментс», Беларусь). Спектры отражения в диапазоне температур 20–130 °C исследовались с помощью спектрометра Ocean optics USB2000+, укомплектованного волоконным зондом отражения QR200-7-UV-VIS. В качестве источника освещения использовалась галогенная вольфрамовая лампа LS-1. При проведении эксперимента образец располагался на нагревательном столике. Температура поверхности образца контролировалась с помощью термопары, прижатой к образцу сверху. Характерная скорость нагрева составляла около 1 °C/мин. В температурном диапазоне 70–80 °C образец нагревался медленнее. Суммарно время выдержки образца в этом диапазоне температур составило 20 мин. Охлаждение происходило естественным путем.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 приведены типичные РЭМ-изображения монодисперсных глобул кремнезема, полученные модифицированным методом Штобера. Размер глобул – около 300 нм.

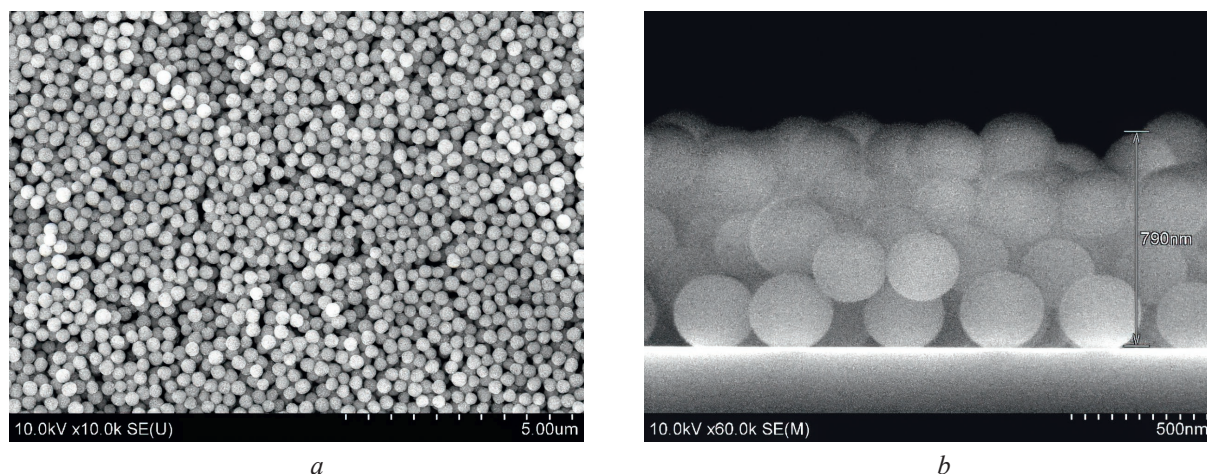


Рис. 1. РЭМ-изображения образцов, полученных центрифугированием суспензии монодисперсных глобул при увеличении: *a* – 10 000; *b* – 50 000

Fig. 1. SEM images of samples obtained by centrifugation of a suspension of monodisperse globules at magnification: *a* – 10 000; *b* – 50 000

Перемешивание суспензии из монодисперсных глобул SiO_2 и золя титаната бария, содержащего компоненты эрбия и иттербия, и ее последующее нанесение на кварцевое стекло приводят к формированию матового твердотельного покрытия с низкой прозрачностью, обусловленной рассеянием видимого света. На рис. 2 показаны: *a* – внешний вид покрытия на черном фоне с изображением цветного пятна в области облучения лазером с длиной волны $\lambda_{ex} = 980$ нм; *b* – спектр ап-конверсионной люминесценции покрытия для $\lambda_{ex} = 980$ нм; *c* – РЭМ-изображение покрытия из монодисперсных глобул и ксерогеля титаната бария, легированного эрбием и иттербием; *d* – спектры пропускания кварцевого стекла с покрытием и исходной подложки кварцевого стекла без покрытия.

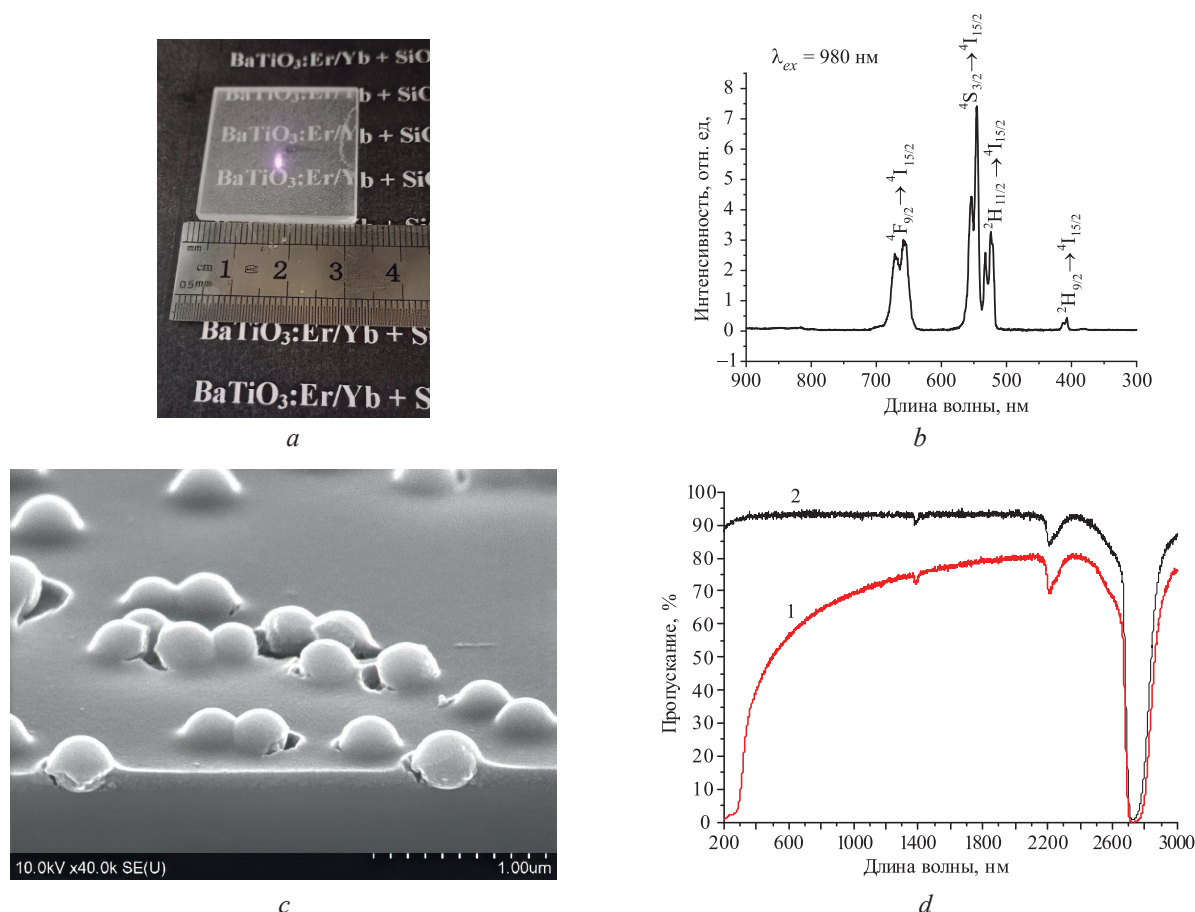


Рис. 2. Внешний вид (*a*), спектр ап-конверсионной люминесценции покрытия (*b*), РЭМ-изображение покрытия из монодисперсных глобул и ксерогеля титаната бария (*c*), спектры пропускания (*d*):
1 – кварцевого стекла с покрытием; 2 – исходной подложки кварцевого стекла без покрытия
Fig. 2. Appearance (*a*), spectrum of up-conversion luminescence of the coating (*b*), SEM image of coatings made of monodisperse globules and barium titanate xerogel (*c*), transmission spectra (*d*):
1 – quartz glass with coating; 2 – original quartz glass substrate without coating

Описанные суспензии могут найти применение для декорирования стекла и других поверхностей, при этом дополнительной опцией является люминесценция внедренных в покрытие люминофоров, что может быть использовано в технологии защиты изделия от подделки или несанкционированного проникновения лазерного излучения ИК-диапазона. В качестве примера на рис. 2, *a* можно наблюдать изображение ап-конверсионной люминесценции в области облучения ИК-лазером. Приведенный на рис. 2, *b* спектр ап-конверсионной люминесценции покрытия характеризуется наличием нескольких полос фотолюминесценции на длинах волн 410, 523, 546 и 658 нм, соответствующих переходам ${}^2\text{H}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ и ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ трехвалентных ионов эрбия.

При достижении упорядочения монодисперсных глобул кремнезема формируются синтетические опалы [2, 3], демонстрирующие фотонную запрещенную зону визуально и при регистрации спектров отражения и пропускания. Пропитка опала этиленгликолем приводит к его

адсорбции. Нагрев опала, содержащего ксерогель титаната бария и остатки этиленгликоля, приводит к испарению компонентов этиленгликоля, что вызывает существенное изменение спектра его отражения в области положения фотонной запрещенной зоны (полосы непрозрачности), характеризуемой интерференционным максимумом в спектре отражения (рис. 3). При нагреве, начиная с комнатной температуры и до 70 °С, наблюдалось постепенное снижение коэффициента отражения образца в полосе, отвечающей фотонной запрещенной зоне. Смещения положения фотонной запрещенной зоны не наблюдалось при низких температурах нагрева. Начиная с 70 °С, отмечался значительный сдвиг полосы фотонной запрещенной зоны в коротковолновую область на величину 37 нм. Сдвиг спектра отражения происходил медленно и сопровождался выпариванием из образца остатков этиленгликоля, которое происходило при 70–80 °С. Во время этого процесса дальнейший нагрев образца был приостановлен. Нагрев возобновлялся после стабилизации положения максимума спектра отражения на длине волны ~600 нм. При нагреве образца от 80 до 130 °С наблюдался практически двукратный рост коэффициента отражения в полосе фотонной запрещенной зоны до 13 %, который сопровождался дальнейшим небольшим сдвигом спектра отражения в коротковолновую область на величину 2–3 нм.

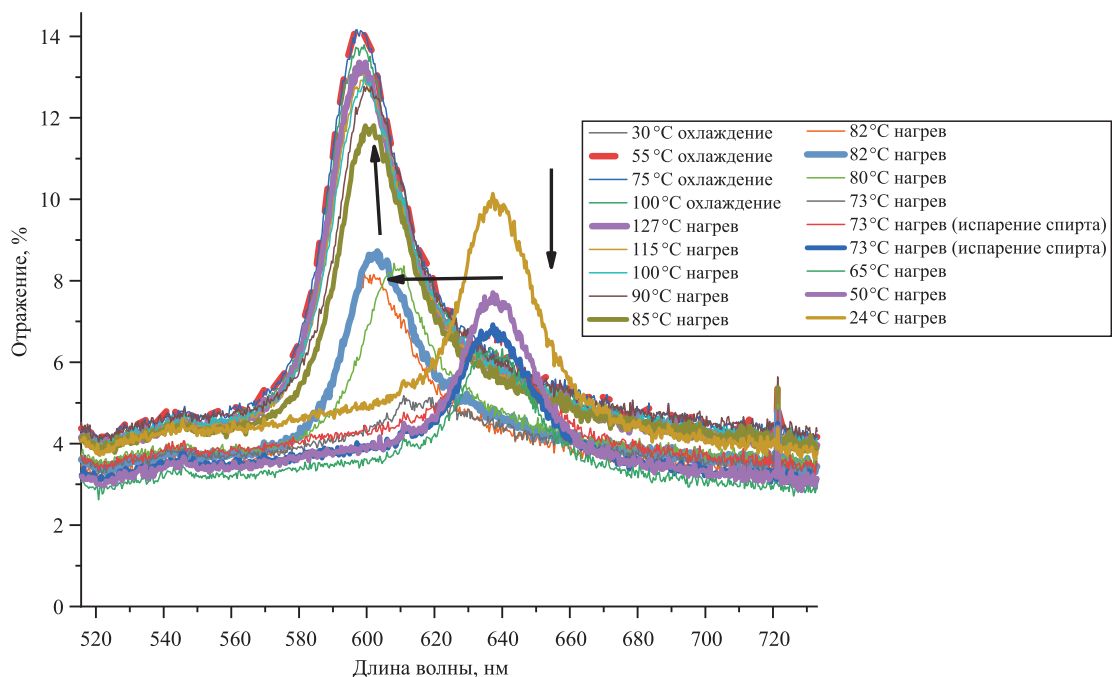


Рис. 3. Спектры отражения опала, записанные в условиях нагрева и охлаждения в диапазоне температур от 24 до 127 °С после пропитки этиленгликолем: стрелки – направление изменения спектров по мере нагревания

Fig. 3. Reflectance spectra of opal recorded under heating and cooling conditions in the temperature range from 24 to 127 °С after impregnation with ethylene glycol: arrows – the direction of change in the spectra as heating proceeds

Длительная термообработка при температуре 600 °С опала из упорядоченных глобул, содержащего ксерогель титаната бария, приводит к исчезновению фотонной запрещенной зоны (рис. 4). Опал становится мутным и непрозрачным на воздухе и в спиртах. При этом фаза титаната бария методом рентгеновской дифракции не обнаружена, хотя наличие трехвалентных лантаноидов в ксерогеле обеспечивает их люминесценцию, наблюдаемую и ранее для рентгеноаморфных пленок ксерогеля титаната бария. Этот результат отличается от проведенных ранее исследований по изменению положения фотонной запрещенной зоны при синтезе в порах опала ксерогеля оксида титана с последующей термообработкой [10].

Отсутствие фотонной запрещенной зоны также демонстрируют опалы, не имеющие регулярной упаковки монодисперсных глобул. На рис. 5, а приведен спектр отражения опала, полученный методом взрывного прессования монодисперсных глобул. Опал имеет белый цвет и характеризуется коэффициентом отражения не более 2,25 %, практически не зависящим от длины

волны в диапазоне 200–1100 нм. В отличие от упорядоченных трехмерных структур (коллоидных фотонных кристаллов – драгоценных опалов), такие опаловые матрицы сравнительно легко получать. При погружении опаловой матрицы в золь оксида титана, содержащий европий, и последующей термообработке при температуре 450 °С получается композит, демонстрирующий видимую люминесценцию европия при возбуждении УФ-излучением (рис. 5, *b*).

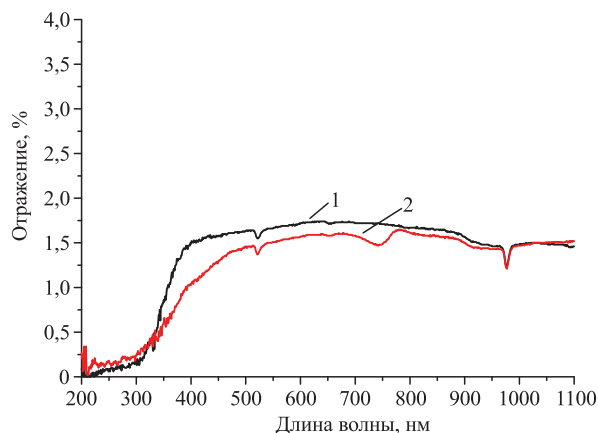


Рис. 4. Спектры отражения опала с ксерогелем титаната бария после длительной термообработки при температуре 600 °С: 1 – на воздухе; 2 – в этаноле

Fig. 4. Reflectance spectra of opal with barium titanate xerogel after prolonged heat treatment at 600 °С: 1 – in air; 2 – in ethanol

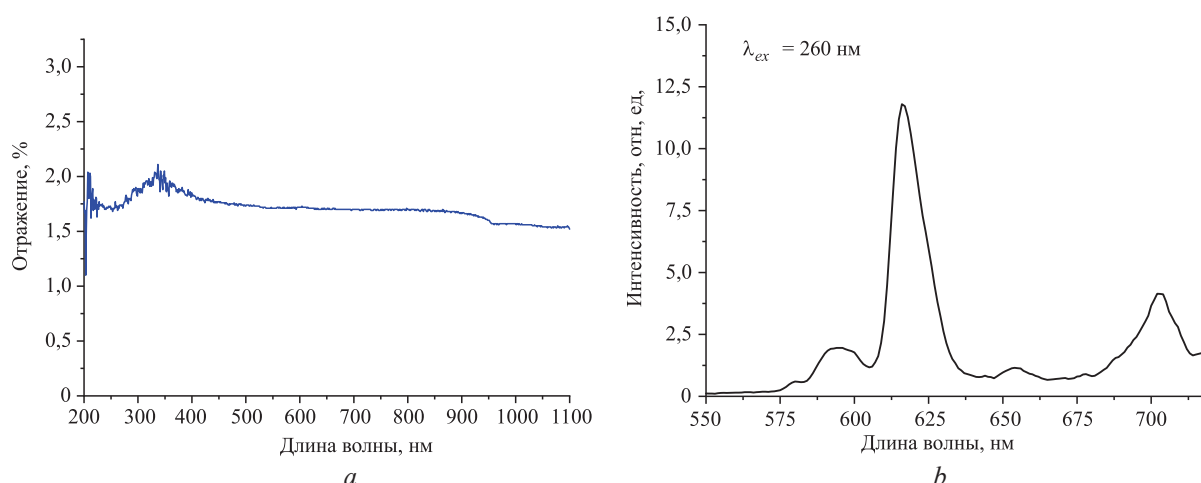


Рис. 5. Спектры опаловой матрицы из неупорядоченной упаковки монодисперсных глобул SiO₂: *a* – отражение до пропитки золем оксида титана; *b* – люминесценция европия после пропитки золем оксида титана и термообработки для $\lambda_{ex} = 260$ нм

Fig. 5. Spectra of the opal SiO₂ matrix from a disordered packing of monodisperse globules: *a* – reflection before impregnation with titanium oxide sol; *b* – luminescence of europium for $\lambda_{ex} = 260$ nm after its impregnation with titanium oxide sol

Заключение

1. Суспензии, состоящие из монодисперсных глобул кремнезема и ксерогеля титаната бария, легированного эрбием и иттербием, обеспечивают формирование матовых рассеивающих покрытий с пониженной прозрачностью, демонстрирующих видимую ап-конверсионную люминесценцию при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 980 нм. Такие покрытия могут применяться для декорирования поверхностей стекол и металлов с дополнительной функцией – люминесценцией, видимой невооруженным глазом.

2. Опаловые матрицы, синтезированные золь-гель-методом и состоящие из регулярной упаковки монодисперсных глобул, содержащие в порах ксерогель, требуют выбора тщательных режимов термообработки для сохранения одновременно фотонной запрещенной зоны и формиро-

вания ксерогеля с требуемой фазой и люминесценцией примесных ионов. Опаловые матрицы, полученные методом взрывного прессования, не имеющие регулярную упаковку глобул, в сочетании с золь-гель-синтезом люминофоров могут при выборе соответствующих примесных ионов найти применение для люминесцентных визуализаторов ИК- и УФ-излучения.

Список литературы

1. Stoeber, W. Controlled Growth of Monodisperse Silica Spheres in the Micron Size Range / W. Stoeber, A. Fink, E. Bohn // *J. Colloid Interface Science*. 1968. Vol. 26. P. 62–69. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(68\)90272-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(68)90272-5).
2. Самойлович, М. И. Способ получения синтетического материала со структурой благородного опала: пат. Рос. Федерации № 2 162 456 С1 / М. И. Самойлович, С. М. Самойлович. Оpubл. 27.01.2001.
3. Photonic Band Gap Phenomenon and Optical Properties of Artificial Opals / V. N. Bogomolov [et al.] // *Phys. Rev. E*. 1997. Vol. 55. P. 7619–7625. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.7619>.
4. Three-Dimensional Photonic Band Gap Structures Doped with Tb³⁺ Ions / N. V. Gaponenko [et al.] // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting'2001*. 2001. P. 214–220. https://doi.org/10.1142/9789812810076_0039.
5. Gaponenko, N. V. Sol-Gel Derived Films in Mesoporous Matrices: Porous Silicon, Anodic Alumina and Artificial Opals / N. V. Gaponenko // *Synthetic Metals*. 2001. Vol. 124, No 1. P. 125–130. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(01\)00447-7](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(01)00447-7).
6. Towards 3D Photonic Crystals / V. M. Shelekhina [et al.] // *Synthetic Metals*. 2001. Vol. 124, No 1. P. 137–139. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(01\)00451-9](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(01)00451-9).
7. Phase Transition-Governed Opal-VO₂ Photonic Crystal / V. G. Golubev [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* 2001. Vol. 79, No 14. P. 2127–2129. <https://doi.org/10.1063/1.1406144>.
8. Controlling the Dynamics of Spontaneous Emission from Quantum Dots by Photonic Crystals / P. Lodahl [et al.] // *Nature*. 2004. Vol. 430. P. 654–657. <https://doi.org/10.1038/nature02772>.
9. Upconversion Luminescence from Sol-Gel-Derived Erbium- and Ytterbium-Doped BaTiO₃ Film Structures and the Target Form / N. V. Gaponenko [et al.] // *Photonics*. 2023. Vol. 10, No 4. <https://doi.org/10.3390/photonics10040359>.
10. Modification of Erbium Photoluminescence Excitation Spectra for the Emission Wavelength 1.54 μm in Mesoscopic Structures / N. V. Gaponenko [et al.] // *Journal of Luminescence*. 2006. Vol. 121. P. 217–221. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2006.07.015>.

References

1. Stoeber W., Fink A., Bohn E. (1968) Controlled Growth of Monodisperse Silica Spheres in the Micron Size Range. *J. Colloid Interface Science*. 26, 62–69. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(68\)90272-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(68)90272-5).
2. Samoylovich M. I., Samoylovich S. M. (2001) Method for Producing Synthetic Material with the Structure of Noble Opal. *Russian Federation Patent No 2 162 456 C1*. Publ. 27.01.2001 (in Russian).
3. Bogomolov V. N., Gaponenko S. V., Germanenko I. N., Kapitonov A. M., Petrov E. P., Gaponenko N. V., et al. (1997) Photonic Band Gap Phenomenon and Optical Properties of Artificial Opals. *Phys. Rev. E*. 55, 7619–7625. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.7619>.
4. Gaponenko N. V., Shelekhina V. M., Prokhorov O. A., Vityaz P. A., Stupak A. P., Ponyavina A. N., et al. (2001) Three-Dimensional Photonic Band Gap Structures Doped with Tb³⁺ Ions. *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting'2001*. 214–220. https://doi.org/10.1142/9789812810076_0039.
5. Gaponenko N. V. (2001) Sol-Gel Derived Films in Mesoporous Matrices: Porous Silicon, Anodic Alumina and Artificial Opals. *Synthetic Metals*. 124 (1), 125–130. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(01\)00447-7](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(01)00447-7).
6. Shelekhina V. M., Prokhorov O. A., Vityaz P. A., Stupak A. P., Gaponenko S. V., Gaponenko N. V. (2001) Towards 3D Photonic Crystals. *Synthetic Metals*. 124 (1), 137–139. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(01\)00451-9](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(01)00451-9).
7. Golubev V. G., Davydov V. Yu., Kartenko N. F., Kurdyukov D. A., Medvedev A. V., Pevtsov A. B., et al. (2001) Phase Transition-Governed Opal-VO₂ Photonic Crystal. *Appl. Phys. Lett.* 79 (14), 2127–2129. <https://doi.org/10.1063/1.1406144>.
8. Lodahl P., van Driel A. F., Nikolaev I. S., Irman A., Overgaag K., Vanmaekelbergh D., et al. (2004) Controlling the Dynamics of Spontaneous Emission from Quantum Dots by Photonic Crystals. *Nature*. 430, 654–657. <https://doi.org/10.1038/nature02772>.
9. Gaponenko N. V., Staskov N. I., Sudnik L. V., Vityaz P. A., Luchanok A. R., Karnilava Yu. D., et al. (2023) Upconversion Luminescence from Sol-Gel-Derived Erbium- and Ytterbium-Doped BaTiO₃ Film Structures and the Target Form. *Photonics*. 10 (4). <https://doi.org/10.3390/photonics10040359>.

10. Gaponenko N. V., Unuchak D. M., Mudryi A. V., Malyarevich G. K., Gusev O. B., Stepikhova M. V., et al. (2006) Modification of Erbium Photoluminescence Excitation Spectra for the Emission Wavelength 1.54 μm in Mesoscopic Structures. *Journal of Luminescence*. 121, 217–221. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2006.07.015>.

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Гапоненко Н. В., д-р физ.-мат. наук, проф., зав. науч.-исслед. лаб. «Нанопотоника» (НИЛ 4.5), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Клещева С. М., канд. геол.-минерал. наук

Лашковская Е. И., мл. науч. сотр. НИЛ 4.5, БГУИР

Лабунув В. А., академик, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Интегрированные микро- и наносистемы», БГУИР

Мартынов И. Л., канд. физ.-мат. наук, доц. каф. физики микро- и наносистем, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Чистяков А. А., д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. физики микро- и наносистем, НИЯУ МИФИ

Каргин Н. И., д-р техн. наук, проф., проректор НИЯУ МИФИ

Райченко Т. Ф., канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. центра «Фотоника атомных и молекулярных структур», Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси

Судник Л. В., д-р техн. наук, зам. дир. науч.-исслед. института импульсных процессов с опытным производством (НИИ ИП с ОП), Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа (ИПМ)

Лученок А. Р., ст. науч. сотр. НИИ ИП с ОП, ИПМ

Ванг М., д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лаб. исследований электронных материалов, Сианьский университет Цзяо Тун

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-75
E-mail: gaponenko@bsuir.by
Гапоненко Николай Васильевич

Information about the authors

Gaponenko N. V., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Head of the R&D Laboratory “Nanophotonics” (Lab 4.5), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Kleshcheva S. M., Cand. of Sci.

Lashkovskaya E. I., Junior Researcher at the Lab 4.5, BSUIR

Labunov V. A., Academician, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Chief Researcher at the R&D Laboratory “Integrated Micro- and Nanosystems”, BSUIR

Martynov I. L., Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Physics of Micro- and Nanosystems, National Research Nuclear University MEPhI (NRNU MEPhI)

Chistyakov A. A., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Head of the Department of Physics of Micro- and Nanosystems, NRNU MEPhI

Kargin N. I., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Vice-Rector of NRNU MEPhI

Raichenok T. F., Cand. of Sci., Leading Researcher at the Center “Photonics of Atomic and Molecular Structures”, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus

Sudnik L. V., Dr. of Sci. (Tech.), Deputy Director of the Research Institute of Impulse Processes with Pilot Production (PIIP with PP), Powder Metallurgy Institute (PMI)

Luchanok A. R., Leading Researcher of the PIIP with PP, PMI

Wang M., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Head of Electronic Materials Laboratory, Xi’an Jiaotong University

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-75
E-mail: gaponenko@bsuir.by
Gaponenko Nikolai Vasilievich