ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-2-250-257
УДК 628.9.03

Влияние термообработки на рост и люминесцентные свойства квантовых точек $CsPbI_3$ во фторофосфатном стекле

Григорий Александрович Капустин[1]✉, Наталья Константиновна Кузьменко[2], Елена Вячеславовна Колобкова[3]

[1,2,3] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
[3] Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация

[1] grigory414@yandex.ru✉, https://orcid.org/0009-0002-3900-9443
[2] nataliakuz01@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7213-8231
[3] kolobok106@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-0134-8434

Аннотация
Введение. Рассмотрено влияние условий термообработки на размеры квантовых точек перовскитов ($CsPbI_3$), сформированных во фторофосфатных стеклах, и изучены их спектральнолюминесцентные свойства. **Метод.** Фторофосфатные стекла с квантовыми точками $CsPbI_3$ получены методом высокотемпературного синтеза из шихтных реактивов с последующей дополнительной термообработкой выше температуры стеклования T_g. Температура термообработки определялась на основании данных дифференциальной сканирующей калориметрии с применением термоанализатора STA 449F1 Jupiter NIETZSCHE. Исследование спектров поглощения проводилось с помощью двухлучевого спектрофотометра Perkin Elmer Lambda 650. Спектры фотолюминесценции были получены при использовании спектрофлуориметра Perkin Elmer LS50B. Абсолютный квантовый выход измерен с помощью системы измерения абсолютного квантового выхода фотолюминисценции PL (Hamamatsu) с блоком интегрирующей сферы. **Основные результаты.** Квантовые точки $CsPbI_3$ были сформированы во фторофосфатном стекле. Рост квантовых точек в стекле контролировался термообработкой при температурах выше T_g путем вариации температуры и длительности. Данные оптических измерений подтвердили образование нанокристаллов $CsPbI_3$ с размерами 6–15 нм. При этом фотолюминесценция квантовых точек $CsPbI_3$ изменялась в диапазоне 625–705 нм. Наблюдается немонотонное изменение величины квантового выхода от температуры термообработки. Максимальный квантовый выход фотолюминесценции $CsPbI_3$ составил 13 %. Показано, что квантовый выход фотолюминесценции $CsPbI_3$ с размерами 10–15 нм слабо зависит от размера квантовых точек и изменяется в пределах 10–13 %. **Обсуждение.** Сделан вывод, что фторофосфатные стекла с квантовыми точками $CsPbI_3$ перспективны в качестве красных люминофоров.

Ключевые слова
фторофосфатное стекло, квантовые точки $CsPbI_3$, фотолюминесценция, квантовый выход

Благодарности
Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-43-20020).

Ссылка для цитирования: Капустин Г.А., Кузьменко Н.К., Колобкова Е.В. Влияние термообработки на рост и люминесцентные свойства квантовых точек $CsPbI_3$ во фторофосфатном стекле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 2. С. 250–257. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-2-250-257

© Капустин Г.А., Кузьменко Н.К., Колобкова Е.В., 2026

Effect of heat treatment on the growth and luminescence of quantum dots $CsPbI_3$ in fluorophosphate glass

Grigory A. Kapustin[1]✉, Nataliya K. Kuzmenko[2], Elena V. Kolobkova[3]

[1,2,3] ITMO University, Saint-Petersburg, 197101, Russian Federation

[3] Saint-Petersburg State Technological University (Technical University), Saint-Petersburg, 190013, Russian Federation

[1] grigory414@yandex.ru✉, https://orcid.org/0009-0002-3900-9443

[2] nataliakuz01@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7213-8231

[3] kolobok106@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-0134-8434

Abstract

The paper examines the influence of heat treatment conditions on the size of quantum dots of $CsPbI_3$ perovskites formed in fluorophosphate glasses and studies their luminescent properties. Fluorophosphate glasses with $CsPbI_3$ quantum dots were obtained by high-temperature synthesis from blend reagents followed by additional heat treatment above the glass transition temperature. The heat treatment temperature was determined on the basis of differential scanning calorimetry data using STA 449F1 Jupiter Nietzsche. Absorption spectra were obtained using a Perkin Elmer Lambda 650 double beam spectrophotometer. Photoluminescence spectra were obtained using a Perkin Elmer LS50B spectrofluorimeter. The absolute quantum yield was measured using a PhotoLuminescence (PL) absolute quantum yield measurement system (Hamamatsu) with an integrating sphere unit. Quantum dots of $CsPbI_3$ were formed in fluorophosphate glass. The growth of quantum dots in glass was controlled by heat treatment at temperatures above glass-transition temperature T_g by adjusting the temperature and duration. Optical measurement data confirmed the formation of $CsPbI_3$ nanocrystals of 6–15 nm in size. The PL of $CsPbI_3$ quantum dots varied in the range of 625–705 nm. There is a non-monotonic variation of the quantum yield value depending on the heat treatment temperature. The maximum quantum yield of luminescence of pure $CsPbI_3$ was 13 %. It is shown that the quantum yield of PL of $CsPbI_3$ quantum dots with sizes of 6–15 nm weakly depends on the size of quantum dots and varies in the range of 10–13 %. It is concluded that fluorophosphate glasses with $CsPbI_3$ quantum dots can be used as red phosphors.

Keywords

fluorophosphate glass, quantum dots of $CsPbI_3$, luminescence, quantum yield

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 24-43-20020).

For citation: Kapustin G.A., Kuzmenko N.K., Kolobkova E.V. Effect of heat treatment on the growth and luminescence of quantum dots $CsPbI_3$ in fluorophosphate glass. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 2, pp. 250–257 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-2-250-257

Введение

В настоящее время исследование нанокристаллов коллоидных неорганических перовскитов ($CsPbI_3$) является актуальной темой благодаря их превосходным оптическим свойствам, таким как высокая квантовая эффективность фотолюминесценции, узкая линия излучения и возможность настройки ширины запрещенной зоны изменением состава или размеров. Также можно отметить легкость синтеза и повышенную фазовую стабильность в сравнении с органо-неорганическими перовскитами [1–6]. Нанокристаллы $CsPbI_3$ отличаются от объемных $CsPbI_3$ вследствие эффекта квантового ограничения, что приводит к появлению таких свойств, как зависимая от размера фотолюминесценция, высокое отношение поверхности к объему, высокий квантовый выход фотолюминесценции (КВФЛ). Коллоидный синтез проводится при комнатных температурах и имеет много преимуществ, связанных с непрерывным контролем роста нанокристаллов и разнообразием методов пост-синтетической модификации состава нанокристаллов [7] и пассивации поверхности. В результате этих операций в коллоидных нанокристаллах $CsPbI_3$ был достигнут квантовый выход 90 % при комнатной температуре [8]. Применение нанокристаллов $CsPbI_3$ в солнечных элементах привело к повышению их эффективности. Альфа-фаза $CsPbI_3$ имеет ширину запрещенной зоны 1,73 эВ, что делает его перспективным материалом в производстве солнечных панелей [8]. Кроме того, чрезвычайно высокая чистота цвета, обусловленная узкими линиями фотолюминесценции и легкой настройкой максимума фотолюминесценции $CsPbI_3$, делают их перспективным материалом для светоизлучающих устройств (светодиоды) [9–12]. Например, светодиоды на основе легированных ионами Zn^{2+} нанокристаллов $CsPbI_3$ показали улучшенные характеристики, достигнув внешней квантовой эффективности 15,1 %. Однако, известно, что металл-галоидные перовскиты нестабильны при воздействии воды, полярных растворителей, кислорода и света, что препятствует их коммерческому применению. Было предложено несколько стратегий для повышения стабильности нанокристаллов и замедления деградации их свойств. Одним из методов повышения стабильности свойств является синтез нанокристаллов и квантовых точек (КТ) в стеклах.

Нанокристаллы $CsPbI_3$ на сегодняшний день получены в фосфоросиликатных [13], боросиликатных [14–16], теллуритных [17], фосфатных [18], фторофосфатных [19], борогерманатных [19–25] и боратных [26, 27] стеклах. Все стекла отличаются достаточно низкими температурами синтеза. Выбор таких стеклообразных систем обусловлен, прежде всего, высокой летучестью галогенсодержащих соединений.

Получение высоких значений КВФЛ в нанокристаллов, сформированных в результате кристаллизации стекол оказалось непростой задачей. Сопоставление

значений КВФЛ, полученных разными группами исследователей для стекол близких составов, активированных нанокристаллов $CsPbI_3$, показывает разброс в пределах 2–10 %, что свидетельствуют о заметном влиянии способа синтеза и методики измерений на величину КВФЛ [28, 29]. Часто приводятся результаты, относящиеся к непрозрачным полностью закристаллизованным средам, полученным из стекла, что не соответствует определению материала, как оптической стеклокерамики. В качестве достоверных результатов можно привести значения квантового выхода для нанокристаллов $CsPbI_3$ в боросиликатных стеклах разного состава 4,2 и 8 % [30, 31].

В настоящей работе для роста нанокристаллов $CsPbI_3$ было использовано фторофосфатное стекло, в котором ранее были получены нанокристаллы $CsPbI_3$ (X = Br, Cl) [32–34]. Выбор фторофосфатных стекол в качестве матрицы для роста квантовых точек (КТ) $CsPbI_3$ обусловлен их способностью сохранять высокие концентрации галоидов и халькогенидов в расплаве, а при охлаждении формировать полупроводниковые нанокристаллы различных составов [35–37].

Цель работы — изучение влияния термообработки и, как следствие, размера КТ $CsPbI_3$ на квантовый выход фотолюминесценции (КВФЛ).

Материалы и методы

В работе были синтезированы фторофосфатные стекла (7 образцов), активированные КТ $CsPbI_3$. Синтез проводился в электрической печи при температуре 1000 °C в течение 30 мин в закрытых стеклоуглеродных тиглях. Выработка стекломассы проводилась на стеклоуглеродную пластину. В результате были получены прозрачные бесцветные стекла без кристаллической фазы (рис. 1, *a*), о чем свидетельствовала граница ультрафиолетового (УФ) поглощения (250 нм). Размер заготовок составлял: в диаметре 8–10 см и толщина 1–2 мм. КТ были выращены в процессе термообработки при температуре 410–460 °C в муфельной печи. Температура термообработки определялась на основании данных дифференциальной сканирующей калориметрии с применением STA 449F1 Jupiter NIETZSCHE. Время термообработки варьировалось в пределах 30–600 мин. Для измерений спектров поглощения и фотолюминесценции использовались полированные образцы площадью не менее 1 см^2 и толщиной 1 мм (рис. 1). Номера образцов стекла соответствуют составам, представленным в таблице.

Спектры поглощения и фотолюминесценции зарегистрированы на двухлучевом спектрофотометре Perkin Elmer Lambda 650 (PerkinElmer, США) и спектрофлуориметре LS50B (PerkinElmer, США) соответственно. Абсолютный квантовый выход измерен с помощью системы измерения абсолютного квантового выхода PL (Hamamatsu, Япония) с блоком интегрирующей сферы.

Результаты и обсуждение

КТ были получены в результате термообработки исходного бесцветного стекла (рис. 1, *a*). Температурно-временные режимы для формирования КТ разных раз-

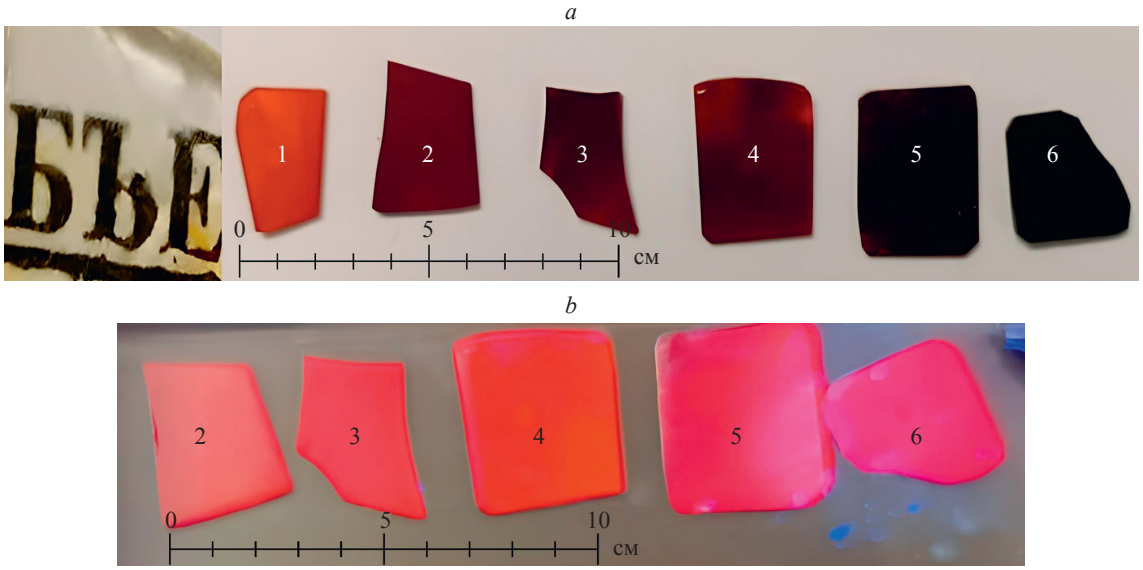

Рис. 1. Изображения исследуемых образцов фторофосфатных стекол: исходный образец (изображен на фоне текста для демонстрации прозрачности) с прекурсорами Cs_2SO_4 и PbF_2, BaI_2 и образцы стекла после термообработки при видимом свете (*a*); образцы стекла после термообработки при возбуждении ультрафиолетовым светом (*b*).

На рис. 1, *b*: исходный образец и образец 1 не представлены, так как они обладают крайне низким квантовым выходом и в ультрафиолетовом свете их различия несущественны

Fig. 1. Photographs of the studied samples of fluorophosphate glass: the initial sample of fluorophosphate glass (shown against the background of the text to demonstrate transparency) with precursors Cs_2SO_4, PbF_2 and BaI_2, and glass samples after heat treatment in visible light (*a*); samples of fluorophosphate glass after heat treatment under ultraviolet light (*b*).

In Fig. 1, *b*: the initial sample and sample 1 are not represented, since they have low quantum yields and their differences are insignificant in ultraviolet light

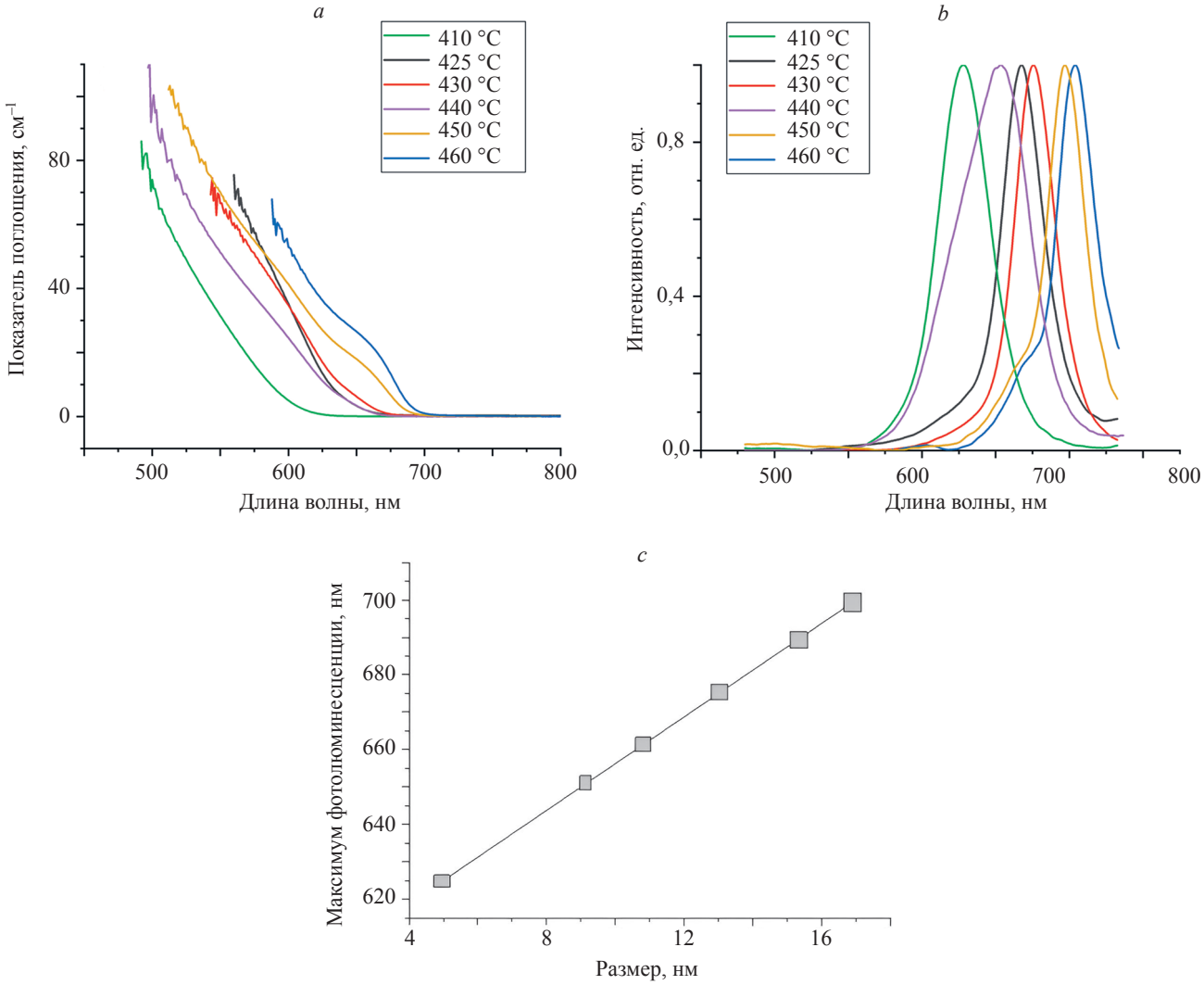

Рис. 2. Спектры поглощения (*a*) и фотолюминесценции (*b*) фторофосфатных стекол с квантовыми точками $CsPbI_3$. Зависимость положения максимума фотолюминесценции от размера квантовых точек со значениями синтезированных квантовых точек $CsPbI_3$, полученная на основании данных [38, 39] (*c*).

Обозначение спектров поглощения и люминесценции соответствуют нумерации образцов в таблице

Fig. 2. Absorption (*a*) and photoluminescence (*b*) spectra of fluorophosphate glass with $CsPbI_3$ quantum dots. Dependence of the position of the photoluminescence maximum on the quantum dots size with the values of the synthesized $CsPbI_3$ quantum dots obtained based on data [38, 39] (*c*).

The designation of the absorption and photoluminescence spectra corresponds to the numbering of the samples in table

Таблица. Условия термообработки образцов при формировании квантовых точек $CsPbI_3$

Table. Properties of heat treatment of the samples during the formation of $CsPbI_3$ quantum dots

Номер образца стекла	Температура термообработки, °C	Время термообработки, мин	Длина волны, нм
Исходное	—	0	—
1	410	300	625
2	425	100	660
3	430	240	675
4	440	100	650
5	450	600	690
6	460	600	705

меров представлены в таблице. Температуры для роста КТ были определены на основании измерения кривых дифференциальной сканирующей калориметрии. Была определена температура стеклования, которая составила 390 °C. Температуры роста были выбраны как температура стеклования $T_g + x$, где x находится в диапазоне 20–70 °C (рис. 1). После термообработки стекла приобретали характерный темно-красный цвет. Соответственно, спектр поглощения последовательно сдвигается в красную область, что характерно для роста КТ в диапазоне размеров квантового ограничения.

На рис. 2, *a* представлены спектры поглощения стекол с КТ в единицах коэффициента поглощения. Наблюдается последовательный сдвиг полосы фотолюминесценции и поглощения в сторону меньших энергий, что свидетельствует о росте размеров КТ. Отсутствие выраженного экситонного пика в спектре поглощения затрудняет определение размера КТ. Однако известно, что для $CsPbI_3$ стоксов сдвиг, соответствующий разности энергии пика экситонного поглощения и излучения, отличается на 30–40 мэВ, что позволяет определять размер КТ по спектру экситонной фотолюминесценции. Исходя из этого, размеры КТ были определены из спектров фотолюминесценции на основании зависимости пика фотолюминесценции от размера КТ (рис. 2, *c*), полученной при сопоставлении результатов электронной просвечивающей микроскопии и фотолюминесценции для коллоидных КТ [38, 39]. Сдвиг спектра фотолюминесценции в сторону меньших энергий сопровождается уменьшением полуширины полосы фотолюминесценции с 50 до 35 нм, что характерно для увеличения размеров КТ. Согласно рис. 2, *b*, были синтезированы КТ с размерами 5, 9, 11, 13, 15 и 18 нм.

Для КТ с размерами 11, 13, 15 и 18 нм был измерен КВФЛ. На рис. 3 представлены зависимости КВФЛ от температуры роста, от максимума полосы фотолюминесценции и от размера КТ. Эти размеры близки или превышают значения радиуса экситона Бора. В отличие от зависимости, полученной для бромидных КТ [32], изменение квантового выхода незначительно. Из общей закономерности выпадает КТ с размерами 18 нм. Резкое уменьшение квантового выхода может быть связано с увеличением дефектов поверхности при длительной выдержке при высоких температурах из-за взаимодействия с матрицей стекла и формированием глубоких ловушек, создающих безызлучательный канал возбуждения [28].

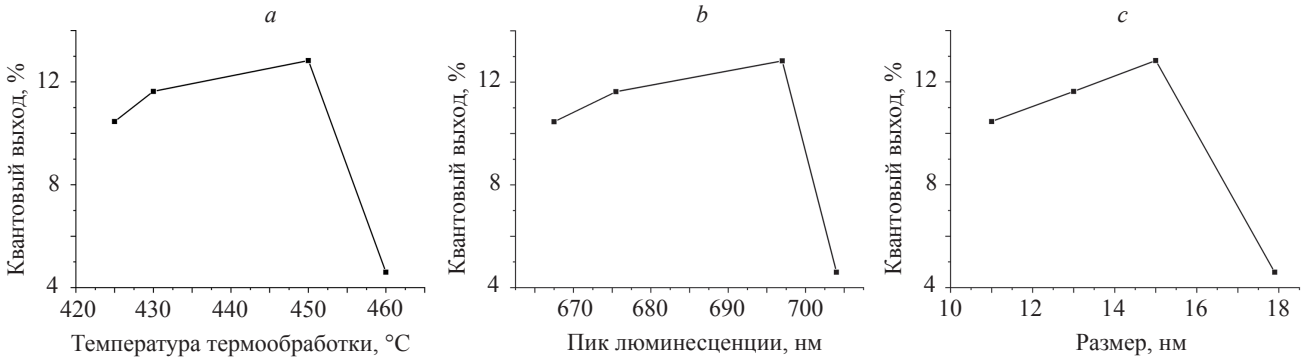

Рис. 3. Зависимости квантового выхода фотолюминесценции квантовых точек от: температуры термообработки (*a*); положения пика фотолюминесценции (*b*); размера квантовых точек (*c*)

Fig. 3. Dependence of the photoluminescence quantum yield of quantum dots on the heat treatment temperature (*a*); photoluminescence maximum (*b*); QD size (*c*)

Заключение

Квантовые точки перовскита $CsPbI_3$ были сформированы во фторофосфатном стекле. Рост квантовых точек в стекле контролировался термообработкой при температурах выше T_g путем регулировки температуры и длительности. Данные оптических измерений подтвердили образование квантовых точек перовскита $CsPbI_3$ с размерами 5–18 нм. При этом максимум пика фотолюминесценции квантовых точек перовскита находится в диапазоне 625–705 нм. Показано, что квантовый выход фотолюминесценции квантовых точек перовскита $CsPbI_3$ с размерами 11–15 нм слабо зависит от размера квантовых точек и изменяется в пределах 10–13 %. Максимальный квантовый выход фотолюминесценции перовскита $CsPbI_3$ 13 %, что превышает ранее полученные результаты для квантовых точек в стеклах.

Литература

1. Chen Q., Wu J., Ou X.Y. Huang B.L., Almutlaq J., Zhumekenov A.A., et al. All-inorganic perovskite nanocrystal scintillators // Nature. 2018. V. 561. N 7721. P. 88–93. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0451-1
2. Kirschner M.S., Diroll B.T., Guo P.J., Haryey S.M., Helweh W., Flanders N.C., et al. Photoinduced, reversible phase transitions in

References

1. Chen Q., Wu J., Ou X.Y. Huang B.L., Almutlaq J., Zhumekenov A.A. All-inorganic perovskite nanocrystal scintillators. *Nature*, 2018, vol. 561, no. 7721, pp. 88–93. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0451-1
2. Kirschner M.S., Diroll B.T., Guo P.J., Haryey S.M., Helweh W., Flanders N.C., et al. Photoinduced, reversible phase transitions in

all-inorganic perovskite nanocrystals // Nature Communications. 2019. V. 10. P. 504. https://doi.org/10.1038/s41467-019-08362-3
3. Nedelcu G., Protesescu L., Yakunin S., Bodnarchuk M.I., Grotevent M.J., Kovalenko M.V. Fast anion-exchange in highly luminescent nanocrystals of cesium lead halide perovskites ($CsPbX_3$, X = Cl, Br, I) // Nano Letters. 2015. V. 15. N 8. P. 5635–5640. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b02404
4. Yang M.R., Moroz P., Miller E., Porotnikov D., Cassidy J., Ellison C., et al. Energy transport in $CsPbBr_3$ perovskite nanocrystal solids // ACS Photonics. 2020. V. 7. N 1. P. 154–164. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.9b01316
5. Motti S.G., Krieg F., Ramadan A.J., Patel J.B., Snaith H.J., Kovalenko M., et al. $CsPbBr_3$ nanocrystal films: Deviations from bulk vibrational and optoelectronic properties // Advanced Functional Materials. 2020. V. 30. N 19. P. 1909904. https://doi.org/10.1002/adfm.201909904
6. Beimborn J.C., Walther L.R., Wilson K.D., Weber J.M. Size-dependent pressure-response of the photoluminescence of $CsPbBr_3$ nanocrystals // The Journal of Physical Chemistry Letters. 2020. V. 11. N 5. P. 1975–1980. https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.0c00174
7. Akkerman Q.A., D'Innocenzo V., Accornero S., Scarpellini A., Petrozza A., Prato M., Manna L. Tuning the optical properties of cesium lead halide perovskite nanocrystals by anion exchange reactions // Journal of the American Chemical Society. 2015. V. 137. N 32. P. 10276–10281. https://doi.org/10.1021/jacs.5b05602
8. Lai H.M., Lu Z., Choi C.K.K., Zhou W., Yau C., Tang B., Ko H. Direct room temperature synthesis of α-$CsPbI_3$ perovskite nanocrystals with high photoluminescence quantum yields: implications for lighting and photovoltaic applications // ACS Applied Nano Materials. 2022. V. 5. N 9. P. 12366−12373. https://doi.org/10.1021/acsanm.2c00732
9. Song J. et al. Quantum dot light-emitting diodes based on inorganic perovskite cesium lead halides ($CsPbX_3$) // Advanced Materials. 2015. V. 27. N 44. P. 7162–7167. https://doi.org/10.1002/adma.201502567
10. Li G., Rivarola F.W.R., Davis N.J.L.K., Bai S., Jellicoe T.C., de la Peña F., et al. Highly efficient perovskite nanocrystal light-emitting diodes enabled by a universal crosslinking method // Advanced Materials. 2016. V. 28. N 18. P. 3528–3534. https://doi.org/10.1002/adma.201600064
11. Kovalenko M.V., Protesescu L., Bodnarchuk M.I. Properties and potential optoelectronic applications of lead halide perovskite nanocrystals // Science. 2017. V. 358. N 6364. P. 745–750. https://doi.org/10.1126/science.aam7093
12. Tan Z.K., Moghaddam R.S., Lai M.L., Docampo P., Higler R., Deschler F., et al. Bright light-emitting diodes based on organometal halide perovskite // Nature Nanotechnology. 2014. V. 9. N 9. P. 687–692. https://doi.org/10.1038/NNANO.2014.149
13. Liu F., Zhang Y.H., Ding C., Kobayashi S., Izuishi T., Nakazawa N., et al. Highly luminescent phase-stable $CsPbI_3$ perovskite quantum dots achieving near 100% absolute photoluminescence quantum yield // ACS Nano. 2017. V. 11. N 10. P. 10373–10383. https://doi.org/10.1021/acsnano.7b05442
14. Li P., Hu C., Zhou L., Jiang J., Cheng Y., He M., et al. Novel synthesis and optical characterization of $CsPb2Br_5$ quantum dots in borosilicate glasses // Materials Letters. 2017. V. 209. P. 483–485. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.08.079
15. Liu S., He M., Di X., Li P., Xiang W., Liang X., et al. Precipitation and tunable emission of cesium lead halide perovskites ($CsPbX_3$, X = Br, I) QDs in borosilicate glass // Ceramics International. 2018. V. 44. N 4. P. 4496–4499. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.012
16. Chen D., Liu Y., Yang C., Zhong J., Zhou S., Chen J., et al. Promoting photoluminescence quantum yields of glass-stabilized $CsPbX_3$ (X = Cl, Br, I) perovskite quantum dots through fluorine doping // Nanoscale. 2019. V. 11. N 37. P. 17216–17221. https://doi.org/10.1039/c9nr07307h
17. Yuan S., Chen D., Li X., Zhong J., Xu X. In situ crystallization synthesis of $CsPbBr_3$ perovskite quantum dot-embedded glasses with improved stability for solid-state lighting and random upconverted lasing // ACS Applied Materials and Interfaces. 2018. V. 10. N 22. P. 18918–18926. https://doi.org/10.1021/acsami.8b05155
18. Xiang X., Lin H., Li R., Cheng Y., Huang Q., Xu J., et al. Stress-induced $CsPbBr_3$ nanocrystallization on glass surface: Unexpected mechanoluminescence and applications // Nano Research. 2019. V. 12. N 5. P. 1049–1054. https://doi.org/10.1007/s12274-019-2338-3

all-inorganic perovskite nanocrystals. *Nature Communications*, 2019, vol. 10, pp. 504. https://doi.org/10.1038/s41467-019-08362-3
3. Nedelcu G., Protesescu L., Yakunin S., Bodnarchuk M.I., Grotevent M.J., Kovalenko M.V. Fast anion-exchange in highly luminescent nanocrystals of cesium lead halide perovskites ($CsPbX_3$, X = Cl, Br, I). *Nano Letters*, 2015, vol. 15, no. 8, pp. 5635–5640. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b02404
4. Yang M.R., Moroz P., Miller E., Porotnikov D., Cassidy J., Ellison C., et al. Energy transport in $CsPbBr_3$ perovskite nanocrystal solids. *ACS Photonics*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 154–164. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.9b01316
5. Motti S.G., Krieg F., Ramadan A.J., Patel J.B., Snaith H.J., Kovalenko M., et al. $CsPbBr_3$ nanocrystal films: Deviations from bulk vibrational and optoelectronic properties. *Advanced Functional Materials*, 2020, vol. 30, no. 19, pp. 1909904. https://doi.org/10.1002/adfm.201909904
6. Beimborn J.C., Walther L.R., Wilson K.D., Weber J.M. Size-dependent pressure-response of the photoluminescence of $CsPbBr_3$ nanocrystals. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2020, vol. 11, no. 5, pp. 1975–1980. https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.0c00174
7. Akkerman Q.A., D'Innocenzo V., Accornero S., Scarpellini A., Petrozza A., Prato M., Manna L. Tuning the optical properties of cesium lead halide perovskite nanocrystals by anion exchange reactions. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, vol. 137, no. 32, pp. 10276–10281. https://doi.org/10.1021/jacs.5b05602
8. Lai H.M., Lu Z., Choi C.K.K., Zhou W., Yau C., Tang B., Ko H. Direct room temperature synthesis of α-$CsPbI_3$ perovskite nanocrystals with high photoluminescence quantum yields: implications for lighting and photovoltaic applications. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, vol. 5, no. 9, pp. 12366−12373. https://doi.org/10.1021/acsanm.2c00732
9. Song J. et al. Quantum dot light-emitting diodes based on inorganic perovskite cesium lead halides ($CsPbX_3$). *Advanced Materials*, 2015, vol. 27, no. 44, pp. 7162–7167. https://doi.org/10.1002/adma.201502567
10. Li G., Rivarola F.W.R., Davis N.J.L.K., Bai S., Jellicoe T.C., de la Peña F., et al. Highly efficient perovskite nanocrystal light-emitting diodes enabled by a universal crosslinking method. *Advanced Materials*, 2016, vol. 28, no. 18, pp. 3528–3534. https://doi.org/10.1002/adma.201600064
11. Kovalenko M.V., Protesescu L., Bodnarchuk M.I. Properties and potential optoelectronic applications of lead halide perovskite nanocrystals. *Science*, 2017, vol. 358, no. 6364, pp. 745–750. https://doi.org/10.1126/science.aam7093
12. Tan Z.K., Moghaddam R.S., Lai M.L., Docampo P., Higler R., Deschler F., et al. Bright light-emitting diodes based on organometal halide perovskite. *Nature Nanotechnology*, 2014, vol. 9, no. 9, pp. 687–692. https://doi.org/10.1038/NNANO.2014.149
13. Liu F., Zhang Y.H., Ding C., Kobayashi S., Izuishi T., Nakazawa N., et al. Highly luminescent phase-stable $CsPbI_3$ perovskite quantum dots achieving near 100% absolute photoluminescence quantum yield. *ACS Nano*, 2017, vol. 11, no. 10, pp. 10373–10383. https://doi.org/10.1021/acsnano.7b05442
14. Li P., Hu C., Zhou L., Jiang J., Cheng Y., He M., et al. Novel synthesis and optical characterization of $CsPb2Br_5$ quantum dots in borosilicate glasses. *Materials Letters*, 2017, vol. 209, pp. 483–485. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.08.079
15. Liu S., He M., Di X., Li P., Xiang W., Liang X., et al. Precipitation and tunable emission of cesium lead halide perovskites ($CsPbX_3$, X = Br, I) QDs in borosilicate glass. *Ceramics International*, 2018, vol. 44, no. 4, pp. 4496–4499. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.012
16. Chen D., Liu Y., Yang C., Zhong J., Zhou S., Chen J., et al. Promoting photoluminescence quantum yields of glass-stabilized $CsPbX_3$ (X = Cl, Br, I) perovskite quantum dots through fluorine doping. *Nanoscale*, 2019, vol. 11, no. 37, pp. 17216–17221. https://doi.org/10.1039/c9nr07307h
17. Yuan S., Chen D., Li X., Zhong J., Xu X. In situ crystallization synthesis of $CsPbBr_3$ perovskite quantum dot-embedded glasses with improved stability for solid-state lighting and random upconverted lasing. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2018, vol. 10, no. 22, pp. 18918–18926. https://doi.org/10.1021/acsami.8b05155
18. Xiang X., Lin H., Li R., Cheng Y., Huang Q., Xu J., et al. Stress-induced $CsPbBr_3$ nanocrystallization on glass surface: Unexpected mechanoluminescence and applications. *Nano Research*, 2019,

19. Chen D., Yuan S., Chen X., Li J., Mao Q., Li X., Zhong J. $CsPbX_3$ (X = Br, I) perovskite quantum dot embedded low-melting phosphosilicate glasses: controllable crystallization, thermal stability and tunable emissions // Journal of Materials Chemistry C. 2018. V. 6. N 25. P. 6832–6839. https://doi.org/10.1039/c8tc02407c
20. Kolobkova E.V., Kuznetsova M.S., Nikonorov N.V. Perovskite $CsPbX_3$ (X = Cl, Br, I) nanocrystals in fluorophosphate glasses // Journal of Non-Crystalline Solids. 2021. V. 563. P. 120811. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120811
21. Pang X., Zhang H., Xie L., Xuan T., Sun Y., Si S., et al. Precipitating $CsPbBr_3$ quantum dots in boro-germanate glass with a dense structure and inert environment toward highly stable and efficient narrow-band green emitters for wide-color-gamut liquid crystal displays // Journal of Materials Chemistry C. 2019. V. 7. N 42. P. 13139–13148. https://doi.org/10.1039/c9tc04732h
22. Ye Y., Zhang W., Zhao Z., Wang J., Liu C., Deng Z., et al. Highly luminescent cesium lead halide perovskite nanocrystals stabilized in glasses for light-emitting applications // Advanced Optical Materials. 2019. V. 7. N 9. P. 1801663. https://doi.org/10.1002/adom.201801663
23. Oreshkina K., Dubrovin V., Sgibnev Y., Nikonorov N., Babkina A., Kulpina E., et al. Spectral properties of $CsPbX_3$ (X = Br, I) perovskite nanocrystals in borogermanate glass-ceramics // Materials Research Bulletin. 2022. V. 149. P. 111720. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2021.111720
24. Wang Q., Tong Y., Yang M., Ye H., Liang X., Wang X., et al. ZnO induced self-crystallization of $CsPb(Br/I)_3$ nanocrystal glasses with improved stability for backlight display application // Journal of Materials Science and Technology. 2022. V. 121. P. 140–147. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.12.060
25. Zhang X., Guo L., Zhang Y., Cheng C., Cheng Y., Li X., et al. Excellent exciton luminescence of $CsPbI_3$ red quantum dots in borate glass // Journal of Non-Crystalline Solids. 2020. V. 541. P. 120066. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120066
26. Zhang Z., Shen L., Zhao Y., Zhang Y., Yang H., Xiang W., et al. Coexisting $CsPbCl_3$: $CsPbI_3$ perovskite nanocrystal glasses with high luminescence and stability // Chemical Engineering Journal. 2020. V. 385. P. 123415. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123415
27. Swarnkar A., Marshall A.R., Sanehira E.M., Chernomordik B.D., Moore D.T., Christians J.A., et al. Quantum dot–induced phase stabilization of α-$CsPbI_3$ perovskite for high-efficiency photovoltaics // Science. 2016. V. 354. N 6308. P. 92–95. https://doi.org/10.1126/science.aag2700
28. Li X., Deng X., Hong J., Lin J., Lv J., Yu M., et al. Color adjustable $CsPbX_3$ (X = Cl, Br, I) perovskite quantum dots germanate glass // Journal of Luminescence. 2024. V. 266. P. 120256. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2023.120256
29. Kharisova R., Babkina A., Zyryanova K., Kuzmenko N., Leonidova A., Valiev D., et al. Mixed-halide $CsPb(BrxI_{1-x})_3$ perovskite nanocrystals in borogermanate glass-ceramics // Ceramics International. 2024. V. 50. N 13. Part B. P. 24618–24625. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.04.196
30. Liu S., Luo Y., He M., Liang X., Xiang W. Novel $CsPbI_3$ QDs glass with chemical stability and optical properties // Journal of the European Ceramic Society. 2018. V. 38. N 4. P. 1998−2004. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.10.012
31. He M., Ding L., Liu S., Shao G., Zhang Z., Liang X., et al. Superior fluorescence and high stability of B-Si -Zn glasses based on Mn-doped $CsPbBr_xI_{3-x}$ nanocrystals // Journal of Alloys and Compounds. 2019. V. 780. P. 318−325. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.382
32. Kolobkova E.V., Semaan R., Kuznetsova M.S., Nikonorov N.V. High-temperature photoluminescence of $CsPbBr_3$ perovskite nanocrystals in the fluorophosphate glasses // Journal of Luminescence. 2023. V. 255. P. 119541. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.119541
33. Kuznetsova M.S., Kolobkova E.V., Bataev M.N., Berdnikov V.S., Pankin D.V., Smirnov M.B., et al. Synthesis and optical properties of perovskite nanocrystals in glass with cationic substitution // The Journal of Chemical Physics. 2024. V. 161. P. 124501. https://doi.org/10.1063/5.0227459
34. Kulebyakina E.V., Skorikov M.L., Kolobkova E., Kuznetsova M.S., Bataev M.N., Yakovlev D.R., et al. Temperature-dependent photoluminescence dynamics of $CsPbBr_3$ and $CsPb(Cl,Br)_3$ perovskite nanocrystals in a glass matrix // Physical Review B. 2024. V. 109. N 23. P. 235301. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.109.235301

vol. 12, no. 5, pp. 1049–1054. https://doi.org/10.1007/s12274-019-2338-3
19. Chen D., Yuan S., Chen X., Li J., Mao Q., Li X., Zhong J. $CsPbX_3$ (X = Br, I) perovskite quantum dot embedded low-melting phosphosilicate glasses: controllable crystallization, thermal stability and tunable emissions. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, vol. 6, no. 25, pp. 6832–6839. https://doi.org/10.1039/c8tc02407c
20. Kolobkova E.V., Kuznetsova M.S., Nikonorov N.V. Perovskite $CsPbX_3$ (X = Cl, Br, I) nanocrystals in fluorophosphate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2021, vol. 563, pp. 120811. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120811
21. Pang X., Zhang H., Xie L., Xuan T., Sun Y., Si S., et al. Precipitating $CsPbBr_3$ quantum dots in boro-germanate glass with a dense structure and inert environment toward highly stable and efficient narrow-band green emitters for wide-color-gamut liquid crystal displays. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, vol. 7, no. 42, pp. 13139–13148. https://doi.org/10.1039/c9tc04732h
22. Ye Y., Zhang W., Zhao Z., Wang J., Liu C., Deng Z., et al. Highly luminescent cesium lead halide perovskite nanocrystals stabilized in glasses for light-emitting applications. *Advanced Optical Materials*, 2019, vol. 7, no. 9, pp. 1801663. https://doi.org/10.1002/adom.201801663
23. Oreshkina K., Dubrovin V., Sgibnev Y., Nikonorov N., Babkina A., Kulpina E., et al. Spectral properties of $CsPbX_3$ (X = Br, I) perovskite nanocrystals in borogermanate glass-ceramics. *Materials Research Bulletin*, 2022, vol. 149, pp. 111720. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2021.111720
24. Wang Q., Tong Y., Yang M., Ye H., Liang X., Wang X., et al. ZnO induced self-crystallization of $CsPb(Br/I)_3$ nanocrystal glasses with improved stability for backlight display application. *Journal of Materials Science and Technology*, 2022, vol. 121, pp. 140–147. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.12.060
25. Zhang X., Guo L., Zhang Y., Cheng C., Cheng Y., Li X., et al. Excellent exciton luminescence of $CsPbI_3$ red quantum dots in borate glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2020, vol. 541, pp. 120066. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120066
26. Zhang Z., Shen L., Zhao Y., Zhang Y., Yang H., Xiang W., et al. Coexisting $CsPbCl_3$: $CsPbI_3$ perovskite nanocrystal glasses with high luminescence and stability. *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 385, pp. 123415. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123415
27. Swarnkar A., Marshall A.R., Sanehira E.M., Chernomordik B.D., Moore D.T., Christians J.A., et al. Quantum dot–induced phase stabilization of α-$CsPbI_3$ perovskite for high-efficiency photovoltaics. *Science*, 2016, vol. 354, no. 6308, pp. 92–95. https://doi.org/10.1126/science.aag2700
28. Li X., Deng X., Hong J., Lin J., Lv J., Yu M., et al. Color adjustable $CsPbX_3$ (X = Cl, Br, I) perovskite quantum dots germanate glass. *Journal of Luminescence*, 2024, vol. 266, pp. 120256. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2023.120256
29. Kharisova R., Babkina A., Zyryanova K., Kuzmenko N., Leonidova A., Valiev D., et al. Mixed-halide $CsPb(BrxI_{1-x})_3$ perovskite nanocrystals in borogermanate glass-ceramics. *Ceramics International*, 2024, vol. 50, no. 13, part B, pp. 24618–24625. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.04.196
30. Liu S., Luo Y., He M., Liang X., Xiang W. Novel $CsPbI_3$ QDs glass with chemical stability and optical properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, vol. 38, no. 4, pp. 1998−2004. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.10.012
31. He M., Ding L., Liu S., Shao G., Zhang Z., Liang X., et al. Superior fluorescence and high stability of B-Si -Zn glasses based on Mn-doped $CsPbBr_xI_{3-x}$ nanocrystals. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 780, pp. 318−325. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.382
32. Kolobkova E.V., Semaan R., Kuznetsova M.S., Nikonorov N.V. High-temperature photoluminescence of $CsPbBr_3$ perovskite nanocrystals in the fluorophosphate glasses. *Journal of Luminescence*, 2023, vol. 255, pp. 119541. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.119541
33. Kuznetsova M.S., Kolobkova E.V., Bataev M.N., Berdnikov V.S., Pankin D.V., Smirnov M.B., et al. Synthesis and optical properties of perovskite nanocrystals in glass with cationic substitution. *The Journal of Chemical Physics*, 2024, vol. 161, pp. 124501. https://doi.org/10.1063/5.0227459
34. Kulebyakina E.V., Skorikov M.L., Kolobkova E., Kuznetsova M.S., Bataev M.N., Yakovlev D.R., et al. Temperature-dependent photoluminescence dynamics of $CsPbBr_3$ and $CsPb(Cl,Br)_3$ perovskite nanocrystals in a glass matrix. *Physical Review B*, 2024,

35. Vaynberg B., Matusovsky M., Rosenbluh M., Kolobkova E., Lipovskii A. High optical nonlinearity of CdS_xSe_{1-x} microcrystals in fluorine-phosphate glass // Optics Communications. 1996. V. 132. N 3-4. P. 307–310. https://doi.org/10.1016/0030-4018(96)00373-2
36. Lipovskii A.A., Yakovlev I.E., Kolobkova E.V., Petrikov V.D. Formation and growth of semiconductor nanocrystals in phosphate glass matrix // Journal of the European Ceramic Society. 1999. V. 19. N 6-7. P. 865–869. https://doi.org/10.1016/s0955-2219(98)00333-1
37. Melekhin V.G., Kolobkova E.V., Lipovskii A.A., Petrikov V.D., Malyarevich A.M., Savitsky V.G. Fluorophosphate glasses doped with PbSe quantum dots and their nonlinear optical characteristics // Glass Physics and Chemistry. 2008. V. 34. N 4. P. 351–355. https://doi.org/10.1134/s1087659608040020
38. Han Y., Liang W., Lin X., Li Y., Sun F., Zhang F., et al. Lattice distortion inducing exciton splitting and coherent quantum beating in $CsPbI_3$ perovskite quantum dots // Nature Materials. 2022. V. 21. N 11. P. 1282–1289. https://doi.org/10.1038/s41563-022-01349-4
39. Hoffman J.B., Schleper A.L., Kamat P.V. Transformation of sintered $CsPbBr_3$ nanocrystals to cubic $CsPbI_3$ and gradient $CsPbBr_xI_{3-x}$ through halide exchange // Journal of the American Chemical Society. 2016. V. 138. N 27. P. 8603−8612. https://doi.org/10.1021/jacs.6b04661

vol. 109, no. 23, pp. 235301. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.109.235301
35. Vaynberg B., Matusovsky M., Rosenbluh M., Kolobkova E., Lipovskii A. High optical nonlinearity of CdS_xSe_{1-x} microcrystals in fluorine-phosphate glass. *Optics Communications*, 1996, vol. 132, no. 3-4, pp. 307–310. https://doi.org/10.1016/0030-4018(96)00373-2
36. Lipovskii A.A., Yakovlev I.E., Kolobkova E.V., Petrikov V.D. Formation and growth of semiconductor nanocrystals in phosphate glass matrix. *Journal of the European Ceramic Society*, 1999, vol. 19, no. 6-7, pp. 865–869. https://doi.org/10.1016/s0955-2219(98)00333-1
37. Melekhin V.G., Kolobkova E.V., Lipovskii A.A., Petrikov V.D., Malyarevich A.M., Savitsky V.G. Fluorophosphate glasses doped with PbSe quantum dots and their nonlinear optical characteristics. *Glass Physics and Chemistry*, 2008, vol. 34, no. 4, pp. 351–355. https://doi.org/10.1134/s1087659608040020
38. Han Y., Liang W., Lin X., Li Y., Sun F., Zhang F., et al. Lattice distortion inducing exciton splitting and coherent quantum beating in $CsPbI_3$ perovskite quantum dots. *Nature Materials*, 2022, vol. 21, no. 11, pp. 1282–1289. https://doi.org/10.1038/s41563-022-01349-4
39. Hoffman J.B., Schleper A.L., Kamat P.V. Transformation of sintered $CsPbBr_3$ nanocrystals to cubic $CsPbI_3$ and gradient $CsPbBr_xI_{3-x}$ through halide exchange. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, vol. 138, no. 27, pp. 8603−8612. https://doi.org/10.1021/jacs.6b04661

Авторы

Капустин Григорий Александрович — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0002-3900-9443, grigory414@yandex.ru
Кузьменко Наталья Константиновна — младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 57216750549, https://orcid.org/0000-0002-7213-8231, nataliakuz01@yandex.ru
Колобкова Елена Вячеславовна — доктор химических наук, профессор, профессор, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 57604636700, https://orcid.org/0000-0002-0134-8434, kolobok106@rambler.ru

Authors

Grigory A. Kapustin – Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0002-3900-9443, grigory414@yandex.ru
Nataliya K. Kuzmenko — Junior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 57216750549, https://orcid.org/0000-0002-7213-8231, nataliakuz01@yandex.ru

Elena V. Kolobkova — D.Sc. (Chemistry), Full Professor, Saint Petersburg State Technological University (Technical University), Saint Petersburg, 190013, Russian Federation; Leading Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 57604636700, https://orcid.org/0000-0002-0134-8434, kolobok106@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 23.10.2025
Одобрена после рецензирования 22.01.2026
Принята к печати 16.03.2026

Received 23.10.2025
Approved after reviewing 22.01.2026
Accepted 16.03.2026

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»