

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-4-724-731

УДК 628.9.03

Люминесцентные свойства нанокристаллов $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ во фторофосфатном стекле

Михаил Викторович Воробьев^{1✉}, Егор Вадимович Швец²,
Наталья Константиновна Кузьменко³, Елена Вячеславовна Колобкова⁴

^{1,2,3,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

⁴ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация

¹ mikhailvorobiev1400@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0009-0002-7692-8449>

² 6214465@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-5100-852X>

³ nkkuzmenko@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7213-8231>

⁴ kolobok106@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0134-8434>

Аннотация

Введение. Получены нанокристаллы перовскита $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ при изменении содержания хлоридов и бромидов во фторофосфатном стекле методом закалки расплава и последующей термической обработки. Изменение отношения ионов хлора (Cl) и брома (Br) в стекле влияло на состав и, как следствие, на ширину запрещенной зоны ΔE_g перовскитных нанокристаллов, обеспечивая регулируемый спектр фотолюминесценции в диапазоне от зеленого до синего излучения. Изучены спектрально-люминесцентные свойства сформированных во фторофосфатном стекле нанокристаллов $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ при изменении отношения Br/Cl. **Метод.** Фторофосфатные стекла с нанокристаллами $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ получены методом высокотемпературного синтеза из шихтовых реактивов с последующей дополнительной термообработкой выше температуры стеклования. Температура обработки определялась на основании данных дифференциальной сканирующей калориметрии с применением STA 449F1 Jupiter Nietzsche. Исследование спектров поглощения проводилось с помощью двухлучевого спектрофотометра Perkin Elmer Lambda 650. Спектры люминесценции были получены с использованием спектрофлуориметра Perkin Elmer LS50B. Абсолютный квантовый выход измерен благодаря системе контроля абсолютного квантового выхода фотолюминесценции (Hamamatsu) с блоком интегрирующей сферы. **Основные результаты.** Нанокристаллы перовскита $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ при изменении отношения Br/Cl были сформированы во фторофосфатном стекле. Рост нанокристаллов в стекле контролировался изотермической обработкой при температурах выше T_g путем регулировки температуры и длительности. Данные оптических измерений подтвердили образование нанокристаллов $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$. При этом положение полосы фотолюминесценции нанокристаллов перовскита изменялось в диапазоне 430–512 нм. Было обнаружено уменьшение квантового выхода фотолюминесценции $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ при увеличении концентрации Cl в составе нанокристалла. Такой эффект можно связать с ростом безызлучательных каналов, происходящих в стекле: рост глубоких ловушечных состояний, усиление поверхностной рекомбинации. **Обсуждение.** Сделан вывод о том, что фторофосфатные стекла с нанокристаллами $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ можно использовать в качестве синих и зеленых люминофоров в области 450–500 нм.

Ключевые слова

фторофосфатное стекло, квантовые точки $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$, фотолюминесценция $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$

Благодарности

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

Ссылка для цитирования: Воробьев М.В., Швец Е.В., Кузьменко Н.К., Колобкова Е.В. Люминесцентные свойства нанокристаллов $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ во фторофосфатном стекле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 4. С. 724–731. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-4-724-731

Luminescent properties of $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ nanocrystals in fluorophosphate glass

Mikhail V. Vorobev¹, Egor V. Shvets², Nataliya K. Kuzmenko³, Elena V. Kolobkova⁴

^{1,2,3,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

⁴ Saint Petersburg State Technological University (Technical University), Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

¹ mikhailvorobiev1400@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7692-8449>

² 6214465@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-5100-852X>

³ nkuzmenko@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7213-8231>

⁴ kolobok106@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0134-8434>

Abstract

$\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ perovskite nanocrystals were synthesized in fluorophosphate glass by melt quenching followed by subsequent heat treatment. The variation of the chlorine (Cl) and bromine (Br) ion ratio in the glass affected the composition and, consequently, the band gap ΔE_g of the perovskite nanocrystals, enabling tunable photoluminescence from green to blue emission. The spectral and luminescent properties of $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ nanocrystals formed in fluorophosphate glass were investigated for different Br/Cl ratios. Fluorophosphate glasses containing $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ nanocrystals were prepared by high-temperature synthesis from batch chemicals followed by additional heat treatment above the glass transition temperature. The heat-treatment temperature was determined from differential scanning calorimetry data obtained using a STA 449F1 Jupiter Nietzsche analyzer. Absorption spectra were measured with a PerkinElmer Lambda 650 double-beam spectrophotometer. Photoluminescence spectra were recorded using a PerkinElmer LS50B spectrofluorometer. The absolute photoluminescence quantum yield was measured with a Hamamatsu absolute quantum yield measurement system equipped with an integrating sphere. $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ perovskite nanocrystals with different Br/Cl ratios were successfully formed in fluorophosphate glass. The growth of nanocrystals in the glass matrix was controlled by isothermal treatment at temperatures above T_g through adjustment of the treatment temperature and duration. Optical measurements confirmed the formation of $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ nanocrystals. The photoluminescence peak position shifted within the range of 430–512 nm. A decrease in the photoluminescence quantum yield of $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ was observed with increasing Cl concentration in the nanocrystals. This effect can be attributed to the enhancement of nonradiative recombination pathways in the glass matrix, including the formation of deep trap states and increased surface recombination. It is concluded that fluorophosphate glasses containing $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ nanocrystals can be used as blue and green phosphors in the 450–500 nm spectral range.

Keywords

fluorophosphate glass, $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ nanocrystals, $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ photoluminescence

Acknowledgements

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

For citation: Vorobev M.V., Shvets E.V., Kuzmenko N.K., Kolobkova E.V. Luminescent properties of $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ nanocrystals in fluorophosphate glass. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 4, pp. 724–731 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-4-724-731

Введение

Коллоидные нанокристаллы (НК) перовскитов галогенидов свинца цезия (CsPbX_3 , $X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) представляют большой интерес как люминесцентные материалы [1–4], благодаря перестраиваемой запрещенной зоне, большой толерантности к дефектам, в результате чего интенсивная и узкая полоса фотолюминесценции (ФЛ) охватывает весь видимый диапазон [5–7] при последовательном замещении аниона в ряду $\text{Cl} \rightarrow \text{Br} \rightarrow \text{I}$. В работах [8–11] изучен высокий квантовый выход ФЛ (Photoluminescence Quantum Yield, PLQY) более 50 % для коллоидных НК CsPbBr_3 , $\text{CsPbBr}_x\text{I}_{3-x}$ или CsPbI_3 без пассивации поверхности. Однако НК CsPbCl_3 и $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ по-прежнему имеют низкий PLQY [8, 12–14] из-за поверхностных и внутренних дефектов [15–17], таких как вакансии свинца и хлора (Cl) [14–16, 18]. Запрещенную зону смешанных галогенидных перовскитов можно монотонно регулировать, контролируя галогенную составляющую. Одна из широко используемых стратегий получения голубых люминофоров (длина волны излучения в диапазоне 450–490 нм) заключается в использовании галогенидных перовскитов с двумя анионами хлора Cl и брома Br

в качестве излучающего материала. Однако миграция ионов галогена при воздействии света или напряжения вызывает разделение на две устойчивые фазы с повышенным содержанием Cl и Br. В результате длина волны электролюминесценции меняется с синей на зеленую во время работы устройства. Для решения проблемы стабилизации химического и фазового составов методами коллоидной химии осуществляется пост-синтетическая пассивация поверхности за счет введения ионов меньшего радиуса [19]. В последние годы появились публикации о различных НК CsPbX_3 , легированных ионами переходных металлов (Sn^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{2+} , Ln^{3+} и Bi^{3+}) [19–26]. Следует отметить, что низкий PLQY, характерный для НК $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$, является не единственным препятствием для их практического применения. Известно, что металл-галогенидные перовскиты нестабильны при воздействии воды, полярных растворителей, кислорода и света, что препятствует их коммерческому применению. Было предложено несколько стратегий для повышения стабильности НК и замедления деградации их свойств. Одним из методов повышения стабильности свойств является синтез НК в стеклах [27–31]. Благодаря хорошей физической и химической стабильности, а также

прозрачности в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра, неорганическое стекло, содержащее НК, рассматривается как перспективный гибридный материал.

Получение высоких значений квантового выхода ФЛ в НК, сформированных в результате кристаллизации стекол, оказалось непростой задачей. Данные PLQY для стекол, активированных НК $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$, практически отсутствуют, как и зависимость от отношения Cl и Br.

В настоящей работе для роста НК $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ было взято фторофосфатное стекло, в котором ранее были получены НК CsPbX_3 ($X = \text{Br}, \text{Cl}, \text{I}$) [32–35]. Выбор фторофосфатных стекол в качестве матрицы для роста квантовых точек CsPbX_3 обусловлен их способностью при охлаждении расплава выделять металлические и полупроводниковые НК различных составов [36–39].

Материалы и методы

Синтезирована серия фторофосфатных стекол, активированных НК CsPbX_3 ($X = \text{Br}, \text{Cl}$) при изменении отношения Cl/Br = 3, 2, 1, 0,5 и 0,3. 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, о чем свидетельствовала граница ультрафиолетового поглощения (325 нм). Размер заготовок составлял в диаметре 8–10 см и толщине 1–2 мм. НК были выращены в процессе термообработки при температуре 410–460 °C в муфельной печи. Температура термической обработки определялась на основании данных дифференциальной сканирующей калориметрии с применением STA 449F1 Jupiter Nietzsche. Время термообработки варьировалось в пределах 30–600 мин. В результате стекла приобретали желтую окраску (рис. 1, а) и под действием ультрафиолетового возбуждения демонстрировали яркое излучение в сине-зеленой области (рис. 1, б, в). Для измерений спектров поглощения и люминесценции использовались пять полированных образцов площадью не менее 1 см² и толщиной 1 мм. Спектры поглощения и ФЛ регистрировались на спектрофотометре

Lambda 650 (PerkinElmer) и спектрофлуориметре LS-55 (PerkinElmer) соответственно. Абсолютный квантовый выход был измерен с помощью системы измерения абсолютного квантового выхода PL (Hamamatsu) с блоком интегрирующей сферы.

Выполнено исследование НК перовскита, формируемые в матричной среде, содержащей флуоратные и фосфатные группы. Проведен анализ влияния этих групп на поведение квантовых точек внутри стеклянной матрицы через изменения оптических свойств материала, таких как сдвиг полосы поглощения и характеристики люминесценции. При этом структура перовскита внутри НК подтверждается косвенно, на основе спектроскопических данных. Ожидается, что изменения в составе стекла могут оказывать влияние на степень искажения перовскитной структуры, что в свою очередь влияет на оптические характеристики НК. Несмотря на отсутствие прямых структурных исследований, таких как рентгеновская дифракция или сканирующая электронная микроскопия, выводы о росте НК и их структуре основываются на анализе люминесценции и сдвиге полосы поглощения, что является надежным показателем изменений в кристаллической структуре и размерах частиц.

Результаты и обсуждение

НК $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ сформированы в процессе выработки расплава и дополнительной термообработки стекла. Для вариации состава НК в шихту вводились разные отношения хлорида бария (BaCl_2) и бромида бария (BaBr_2), концентрации которых представлены в таблице. Температуры стеклования T_g определена на основании измерения кривых дифференциальной сканирующей калориметрии и составила 390 °C (рис. 2). Температуры роста были выбраны как T_{g+x} , где x в диапазоне 20–40 °C.

После термообработки стекла приобретают желтый цвет (рис. 1, а). Свидетельством завершения формирования НК было отсутствие сдвига границы зоны при увеличении времени и температуры обработки. Такой способ роста позволяет определять состав НК на основании оптических измерений, так как исключается влияние размерного ограничения. В результате ширина запрещенной зоны ΔE_g определяется только отноше-

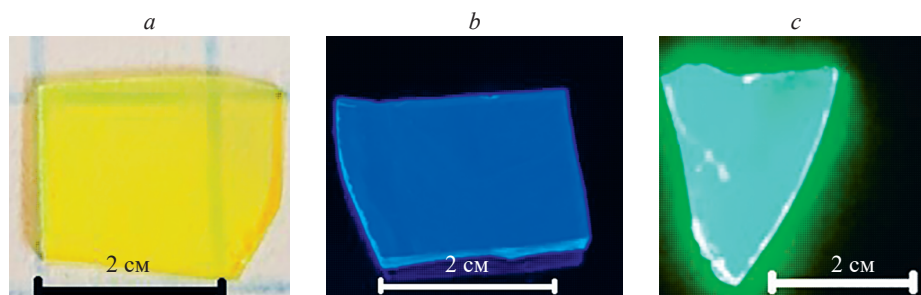
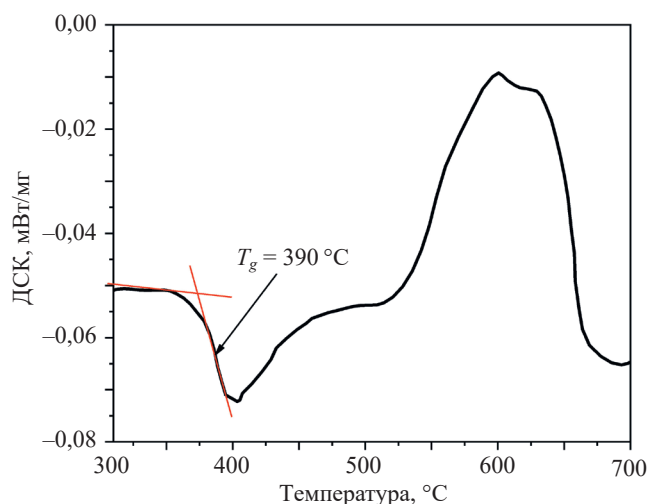


Рис. 1. Фотографии исследуемых образцов фторофосфатных стекол с нанокристаллами: $\text{CsPbBr}_{1.5}\text{Cl}_{1.5}$ (образец 4) при дневном освещении (а); CsPbBrCl_2 (образец 2) (б) и CsPbBr_2Cl (образец 3) (в) при ультрафиолетовом возбуждении

Fig. 1. Photographs of the investigated fluorophosphate glass samples containing perovskite nanocrystals: $\text{CsPbBr}_{1.5}\text{Cl}_{1.5}$ (sample 4) under daylight illumination (a); CsPbBrCl_2 (sample 2) (b) and CsPbBr_2Cl (sample 3) (c) under ultraviolet excitation

Таблица. Составы и люминесцентные свойства стекол с нанокристаллами $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ Table. Compositions and luminescent properties of glasses with $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ nanocrystals

Номер образца	Состав нанокристалла	BaCl_2 по синтезу, мол. %	BaBr_2 по синтезу, мол. %	Длина волны максимума ФЛ, нм	Квантовый выход, %
1	$\text{CsPbBr}_{0,7}\text{Cl}_{2,3}$	6,1	2,1	430	5
2	$\text{CsPbBr}_1\text{Cl}_2$	5,3	2,1	450	7
3	$\text{CsPbBr}_2\text{Cl}_1$	3,3	6,3	496	50
4	$\text{CsPbBr}_{1,5}\text{Cl}_{1,5}$	4,1	3,4	480	40
5	$\text{CsPbBr}_{2,3}\text{Cl}_{0,7}$	2,1	4,2	512	60

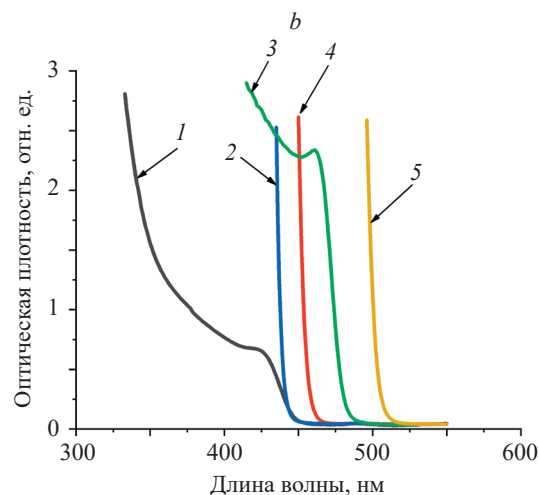
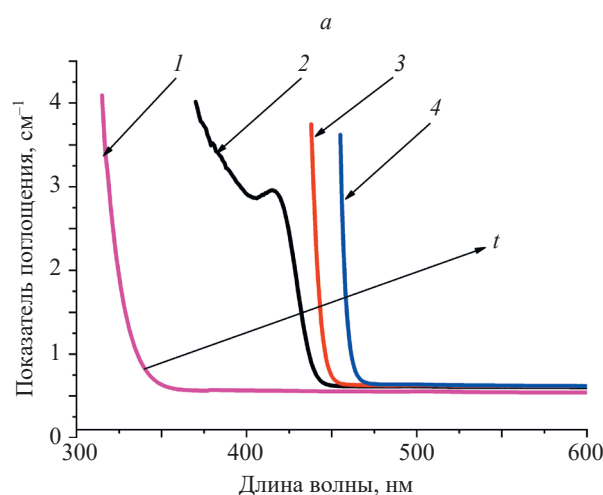
Рис. 2. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) для стекла с нанокристаллом $\text{CsPbBr}_{1,5}\text{Cl}_{1,5}$ (образец 4)Fig. 2. Differential scanning calorimetry (ДСК) of the glass with $\text{CsPbBr}_{1,5}\text{Cl}_{1,5}$ nanocrystal (sample 4)

ем Cl и Br. Рис. 3, а демонстрирует последовательный сдвиг границы поглощения стекла образца 4 (таблица) при увеличении времени термообработки. Дальнейшая

термообработка свыше 60 мин не приводила к изменению границы поглощения, что свидетельствовало о росте НК, для которых отсутствует влияние размерного ограничения.

В таблице приведены концентрации компонентов стекла, введенные при синтезе. В процессе синтеза летучие компоненты (Cl и Br) изменяют свою концентрацию в разных пропорциях, за счет чего происходит нарушение их исходного соотношения. Кроме того, не весь Cl и Br идет на рост НК, некоторая часть Cl остается в матрице стекла. По мере увеличения доли Br наблюдается устойчивое смещение края поглощения в длинноволновую область (рис. 3, b). Такая зависимость объясняется увеличением ширины запрещенной зоны при замещении иона Br на ион меньшего радиуса Cl.

Для определения реального состава НК традиционно используется метод рентгеновской дифракции. Однако составы НК, сформированных в стекле, могут быть определены оптическими методами на основании измеренных спектров ФЛ. Известно, что длина волны максимума полосы ФЛ НК CsPbCl_3 соответствует 420 нм, а для CsPbBr_3 эта величина составляет 530 нм. В результате между этими крайними составами существует непрерывный ряд твердых растворов с переменным соотношением Cl и Br (рис. 4, a). На

Рис. 3. Сдвиг границы поглощения стекла (образец 4) с нанокристаллами $\text{CsPbBr}_{1,5}\text{Cl}_{1,5}$ после термообработки при $T = 420^\circ\text{C}$ и времени t (мин): 0 (кривая 1), 20 (кривая 2), 40 (кривая 3), 60 (кривая 4) (a); зависимость границы пропускания от соотношения хлора и брома в нанокристалле для образцов 1–5 (b)Fig. 3. Shift of the absorption edge of the glass (sample 4) with $\text{CsPbBr}_{1,5}\text{Cl}_{1,5}$ nanocrystals after heat treatment at $T = 420^\circ\text{C}$ and time t (min): 0 (curve 1), 20 (curve 2), 40 (curve 3), 60 (curve 4) (a); dependence of the transmission edge on the chlorine-to-bromine ratio in the nanocrystal for samples 1–5 (b)

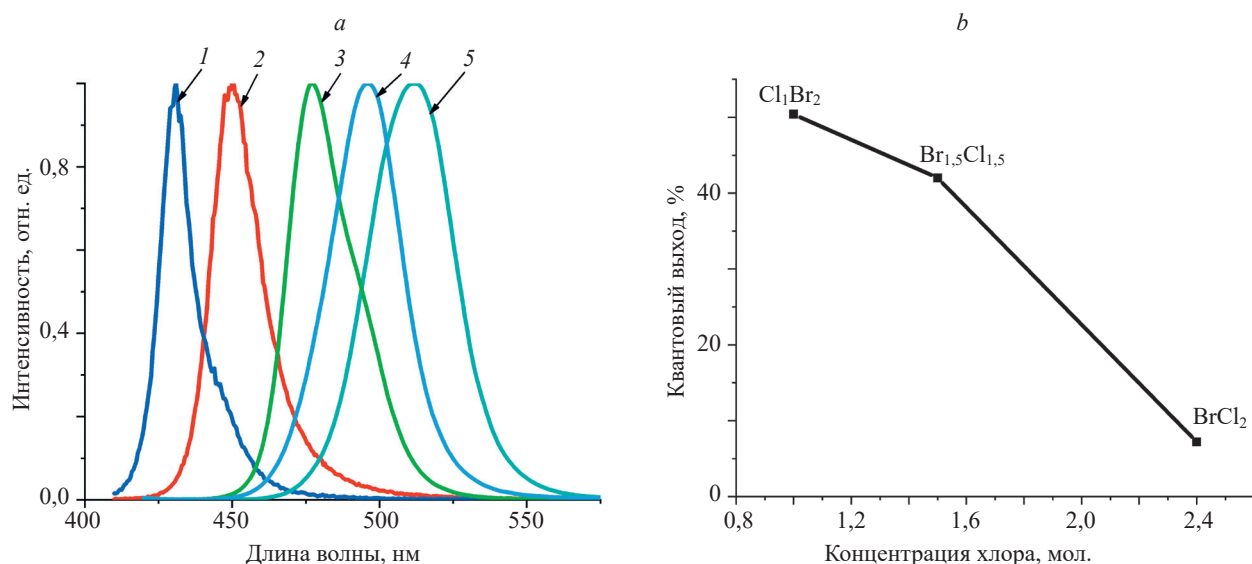


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции стекол (образцы 1–5) (a); зависимость квантового выхода фотолюминесценции при изменении концентрации хлора и брома в составе нанокристаллов, сформированных в фторофосфатном стекле (b)

Fig. 4. Photoluminescence spectra of the glasses (samples 1–5) (a); dependence of the photoluminescence quantum yield on the variation of chlorine and bromine concentration in the nanocrystals formed in the fluorophosphate glass (b)

рис. 4, b показана зависимость квантового выхода от содержания Cl. Если для бромидных НК квантовый выход достигает 50–60 %, то при высоком содержании Cl значения падают до 5–7 %. Аналогичная зависимость была получена для коллоидных НК без дополнительной пассивации поверхности [5]. Сделано предположение, что уменьшение квантового выхода можно объяснить активизацией при повышении температуры тушащих центров, связанных преимущественно с вакансиями Cl [15, 21].

Закключение

Нанокристаллы перовскита $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ при изменении отношения брома и хлора были сформированы во фторофосфатном стекле. Рост нанокристаллов в

стекле контролировался изотермической обработкой при температурах выше T_g путем регулировки температуры и длительности. Данные оптических измерений подтвердили образование нанокристаллов $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$. При этом положение полосы люминесценции нанокристаллов перовскита изменялось в диапазоне 430–510 нм. Было обнаружено уменьшение квантового выхода люминесценции перовскита $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{Cl}_{1-x})_3$ при увеличении концентрации хлора в составе нанокристалла. Полученная зависимость и абсолютные значения квантового выхода от содержания хлора в нанокристаллах совпадает с зависимостью для коллоидных нанокристаллов аналогичного состава без дополнительной обработки, что свидетельствует о сходстве механизмов, ответственных за уменьшение квантового выхода.

Литература

1. Dong Y., Qiao T., Kim D., Parobek D., Rossi D., Hee D., Son D.H. Precise control of quantum confinement in cesium lead halide perovskite quantum dots via thermodynamic equilibrium // *Nano Letters*. 2018. V. 18. N 6. P. 3716–3722. doi: 10.1021/acs.nanolett.8b00861
2. 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. doi: 10.1021/acs.nanolett.5b02404
3. Li X., Wu Y., Zhang S., Cai B., Gu Y., Song J., et al. CsPbX_3 quantum dots for lighting and displays: room-temperature synthesis, photoluminescence superiorities, underlying origins and white light-emitting diodes // *Advanced Functional Materials*. 2016. V. 26. N 15. P. 2435–2445. doi: 10.1002/adfm.201600109
4. Wei S., Yang Y.C., Kang X.J., Wang L., Huang L.J., Pan D.C. Room-temperature and gram-scale synthesis of CsPbX_3 (X = Cl, Br, I) perovskite nanocrystals with 50–85% photoluminescence quantum yields // *Chemical Communications*. 2016. V. 52. N 45. P. 7265–7268. doi: 10.1039/c6cc01500j

References

1. Dong Y., Qiao T., Kim D., Parobek D., Rossi D., Hee D., Son D.H. Precise control of quantum confinement in cesium lead halide perovskite quantum dots via thermodynamic equilibrium. *Nano Letters*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 3716–3722. doi: 10.1021/acs.nanolett.8b00861
2. 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. doi: 10.1021/acs.nanolett.5b02404
3. Li X., Wu Y., Zhang S., Cai B., Gu Y., Song J., et al. CsPbX_3 quantum dots for lighting and displays: room-temperature synthesis, photoluminescence superiorities, underlying origins and white light-emitting diodes. *Advanced Functional Materials*, 2016, vol. 26, no. 15, pp. 2435–2445. doi: 10.1002/adfm.201600109
4. Wei S., Yang Y.C., Kang X.J., Wang L., Huang L.J., Pan D.C. Room-temperature and gram-scale synthesis of CsPbX_3 (X = Cl, Br, I) perovskite nanocrystals with 50–85% photoluminescence quantum yields. *Chemical Communications*, 2016, vol. 52, no. 45, pp. 7265–7268. doi: 10.1039/c6cc01500j

5. Akkerman Q.A., D'Innocenzo V., Accornero S., Scarpellini A., Petrozza A., Prato M., et al. 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. doi: 10.1021/jacs.5b05602
6. Kim Y., Yassitepe E., Voznyy O., Comin R., Walters G., Gong X.W., et al. Efficient luminescence from perovskite quantum dot solids // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2015. V. 7. N 45. P. 25007–25013. doi: 10.1021/acsami.5b09084
7. Chen D.Q., Chen X. Luminescent perovskite quantum dots: synthesis, microstructures, optical properties and applications // *Journal of Materials Chemistry C*. 2019. V. 7. N 6. P. 1413–1446. doi: 10.1039/c8tc05545a
8. Grisorio R., Di Clemente M.E., Fanizza E., Allegretta I., Altamura D., Striccoli M., et al. Exploring the surface chemistry of cesium lead halide perovskite nanocrystals // *Nanoscale*. 2019. V. 11. N 3. P. 986–999. doi: 10.1039/c8nr08011a
9. Li Y., Wang X.Y., Xue W.N., Wang W., Zhu W., Zhao L.J. Highly luminescent and stable CsPbBr₃ perovskite quantum dots modified by phosphine ligands // *Nano Research*. 2019. V. 12. N 4. P. 785–789. doi: 10.1007/s12274-019-2289-8
10. Yuan S., Chen D.Q., Li X.Y., Zhong J.S., Xu X.H. In situ crystallization synthesis of CsPbBr₃ 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. doi: 10.1021/acsami.8b05155
11. Sun S., Yuan D., Xu Y., Wang A.F., Deng Z.T. Ligand-mediated synthesis of shape-controlled cesium lead halide perovskite nanocrystals via reprecipitation process at room temperature // *ACS Nano*. 2016. V. 10. N 3. P. 3648–3657. doi: 10.1021/acsnano.5b08193
12. Tong Y., Bladt E., Aygüler M.F., Manzi A., Milowska K.Z., Hintermayr V.A., et al. Highly luminescent cesium lead halide perovskite nanocrystals with tunable composition and thickness by ultrasonication // *Angewandte Chemie International Edition*. 2016. V. 55. N 44. P. 13887–13892. doi: 10.1002/anie.201605909
13. Liu Y., Pan G., Wang R., Shao H., Wang H., Xu W., et al. Considerably enhanced exciton emission of CsPbCl₃ perovskite quantum dots by the introduction of potassium and lanthanide ions // *Nanoscale*. 2018. V. 10. N 29. P. 14067–14072. doi: 10.1039/c8nr03581d
14. Jia C., Li H., Tan L.F., Meng X.W., Gao J.B., Li H.B. Observation and implication of halide exchange beyond CsPbX₃ perovskite nanocrystals // *Nanoscale*. 2019. V. 11. N 7. P. 3123–3128. doi: 10.1039/c8nr10150g
15. Ahmed G.H., El-Demellawi J.K., Yin J., Pan J., Velusamy D.B., Hedhili M.N., et al. Giant photoluminescence enhancement in CsPbCl₃ perovskite nanocrystals by simultaneous dual-surface passivation // *ACS Energy Letters*. 2018. V. 3. N 10. P. 2301–2307. doi: 10.1021/acsenrgylett.8b01441
16. 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. doi: 10.1126/science.aam7093
17. Protesescu L., Yakunin S., Bodnarchuk M.I., Krieg F., Caputo R., Hendon C.H., et al. Nanocrystals of cesium lead halide perovskites (CsPbX₃, X = Cl, Br, and I): novel optoelectronic materials showing bright emission with wide color gamut // *Nano Letters*. 2015. V. 15. N 6. P. 3692–3696. doi: 10.1021/nl5048779
18. Yong Z.-J., Guo S.-Q., Ma J.-P., Zhang J.-Y., Li Z.-Y., Chen Y.-M., et al. Doping-enhanced short-range order of perovskite nanocrystals for near-unity violet luminescence quantum yield // *Journal of the American Chemical Society*. 2018. V. 140. N 31. P. 9942–9951. doi: 10.1021/jacs.8b04763
19. Ahmed G.H., Yin J., Bakr O.M., Mohammed O.F. Near-unity photoluminescence quantum yield in inorganic perovskite nanocrystals by metal-ion doping // *The Journal of Chemical Physics*. 2020. V. 152. N 2. P. 020902. doi: 10.1063/1.5131807
20. Van der Stam W., Geuchies J.J., Altantzis T., van den Bos K.H.W., Meeldijk J.D., Van Aert S., et al. Highly emissive divalent-ion-doped colloidal CsPb_{1-x}M_xBr₃ perovskite nanocrystals through cation exchange // *Journal of the American Chemical Society*. 2017. V. 139. N 11. P. 4087–4097. doi: 10.1021/jacs.6b13079
21. Xie C., Zhao Y., Shi W., Yang P. Postsynthetic surface-treatment of CsPbX₃ (X = Cl, Br, or I) nanocrystals via CdX₂ precursor solution toward high photoluminescence quantum yield // *Langmuir*. 2021. V. 37. N 3. P. 1183–1193. doi: 10.1021/acs.langmuir.0c03066
5. Akkerman Q.A., D'Innocenzo V., Accornero S., Scarpellini A., Petrozza A., Prato M., et al. 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. doi: 10.1021/jacs.5b05602
6. Chen D.Q., Chen X. Luminescent perovskite quantum dots: synthesis, microstructures, optical properties and applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, vol. 7, no. 6, pp. 1413–1446. doi: 10.1039/c8tc05545a
7. Chen D.Q., Chen X. Luminescent perovskite quantum dots: synthesis, microstructures, optical properties and applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, vol. 7, no. 6, pp. 1413–1446. doi: 10.1039/c8tc05545a
8. Grisorio R., Di Clemente M.E., Fanizza E., Allegretta I., Altamura D., Striccoli M., et al. Exploring the surface chemistry of cesium lead halide perovskite nanocrystals. *Nanoscale*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 986–999. doi: 10.1039/c8nr08011a
9. Li Y., Wang X.Y., Xue W.N., Wang W., Zhu W., Zhao L.J. Highly luminescent and stable CsPbBr₃ perovskite quantum dots modified by phosphine ligands. *Nano Research*, 2019, vol. 12, no. 4, pp. 785–789. doi: 10.1007/s12274-019-2289-8
10. Yuan S., Chen D.Q., Li X.Y., Zhong J.S., Xu X.H. In situ crystallization synthesis of CsPbBr₃ 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. doi: 10.1021/acsami.8b05155
11. Sun S., Yuan D., Xu Y., Wang A.F., Deng Z.T. Ligand-mediated synthesis of shape-controlled cesium lead halide perovskite nanocrystals via reprecipitation process at room temperature. *ACS Nano*, 2016, vol. 10, no. 3, pp. 3648–3657. doi: 10.1021/acsnano.5b08193
12. Tong Y., Bladt E., Aygüler M.F., Manzi A., Milowska K.Z., Hintermayr V.A., et al. Highly luminescent cesium lead halide perovskite nanocrystals with tunable composition and thickness by ultrasonication. *Angewandte Chemie International Edition*, 2016, vol. 55, no. 44, pp. 13887–13892. doi: 10.1002/anie.201605909
13. Liu Y., Pan G., Wang R., Shao H., Wang H., Xu W., et al. Considerably enhanced exciton emission of CsPbCl₃ perovskite quantum dots by the introduction of potassium and lanthanide ions. *Nanoscale*, 2018, vol. 10, no. 29, pp. 14067–14072. doi: 10.1039/c8nr03581d
14. Jia C., Li H., Tan L.F., Meng X.W., Gao J.B., Li H.B. Observation and implication of halide exchange beyond CsPbX₃ perovskite nanocrystals. *Nanoscale*, 2019, vol. 11, no. 7, pp. 3123–3128. doi: 10.1039/c8nr10150g
15. Ahmed G.H., El-Demellawi J.K., Yin J., Pan J., Velusamy D.B., Hedhili M.N., et al. Giant photoluminescence enhancement in CsPbCl₃ perovskite nanocrystals by simultaneous dual-surface passivation. *ACS Energy Letters*, 2018, vol. 3, no. 10, pp. 2301–2307. doi: 10.1021/acsenrgylett.8b01441
16. 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. doi: 10.1126/science.aam7093
17. Protesescu L., Yakunin S., Bodnarchuk M.I., Krieg F., Caputo R., Hendon C.H., et al. Nanocrystals of cesium lead halide perovskites (CsPbX₃, X = Cl, Br, and I): novel optoelectronic materials showing bright emission with wide color gamut. *Nano Letters*, 2015, vol. 15, no. 6, pp. 3692–3696. doi: 10.1021/nl5048779
18. Yong Z.-J., Guo S.-Q., Ma J.-P., Zhang J.-Y., Li Z.-Y., Chen Y.-M., et al. Doping-enhanced short-range order of perovskite nanocrystals for near-unity violet luminescence quantum yield. *Journal of the American Chemical Society*, 2018, vol. 140, no. 31, pp. 9942–9951. doi: 10.1021/jacs.8b04763
19. Ahmed G.H., Yin J., Bakr O.M., Mohammed O.F. Near-unity photoluminescence quantum yield in inorganic perovskite nanocrystals by metal-ion doping. *The Journal of Chemical Physics*, 2020, vol. 152, no. 2, pp. 020902. doi: 10.1063/1.5131807
20. Van der Stam W., Geuchies J.J., Altantzis T., van den Bos K.H.W., Meeldijk J.D., Van Aert S., et al. Highly emissive divalent-ion-doped colloidal CsPb_{1-x}M_xBr₃ perovskite nanocrystals through cation exchange. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, vol. 139, no. 11, pp. 4087–4097. doi: 10.1021/jacs.6b13079
21. Xie C., Zhao Y., Shi W., Yang P. Postsynthetic surface-treatment of CsPbX₃ (X = Cl, Br, or I) nanocrystals via CdX₂ precursor solution toward high photoluminescence quantum yield. *Langmuir*, 2021, vol. 37, no. 3, pp. 1183–1193. doi: 10.1021/acs.langmuir.0c03066

22. Shao H., Bai X., Cui H., Pan G., Jing P., Qu S., et al. White light emission in $\text{Bi}^{3+}/\text{Mn}^{2+}$ ion co-doped CsPbCl_3 perovskite nanocrystals // *Nanoscale*. 2018. V. 10. N 3. P. 1023–1029. doi: 10.1039/c7nr08136g
23. Mondal N., De A., Samanta A. Achieving near-unity photoluminescence efficiency for blue-violet-emitting perovskite nanocrystals // *ACS Energy Letters*. 2019. V. 4. N 1. P. 32–39. doi: 10.1021/acseenergylett.8b01909
24. Niu W., Chen R.H., Pang T., Zheng Y.H., Wu T., Zhang R., et al. Boosting hot carrier cooling in halide perovskite quantum dots via Ni^{2+} doping // *Advanced Optical Materials*. 2024. V. 12. N 19. P. 2400307. doi: 10.1002/adom.202400307
25. Chen D., Fang G.L., Chen X. Silica-coated Mn-doped $\text{CsPb}(\text{Cl}/\text{Br})_3$ inorganic perovskite quantum dots: exciton-to-Mn energy transfer and blue-excitable solid-state lighting // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2017. V. 9. N 46. P. 40477–40487. doi: 10.1021/acsami.7b14471
26. Chen W., Shi T.C., Du J., Zang Z., Yao Z., Li M., et al. Highly stable silica-wrapped Mn-doped CsPbCl_3 quantum dots for bright white light-emitting devices // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2018. V. 10. N 50. P. 43978–43986. doi: 10.1021/acsami.8b14046
27. Liu M., Jiang N., Huang H., Lin J., Huang F., Zheng Y., et al. Ni^{2+} -doped CsPbI_3 perovskite nanocrystals with near-unity photoluminescence quantum yield and superior structure stability for red light-emitting devices // *Chemical Engineering Journal*. 2021. V. 413. P. 127547. doi: 10.1016/j.cej.2020.127547
28. Zhou Y., Liu C., Zhao Z., Zhang W., Li K., Ye Y., et al. Enhanced luminescence of Mn doped CsPbCl_3 and $\text{CsPb}(\text{Cl}/\text{Br})_3$ perovskite nanocrystals stabilized in glasses // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. V. 827. P. 154349. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154349
29. Song L., Zhang X., Zhang H., Xu S., Zhang J., Wang Y., et al. Improving luminescence characteristics of Ni^{2+} doped CsPbX_3 ($\text{X} = \text{Br}/\text{I}$) quantum dots in borogermanate glass for wide color gamut display // *Ceramics International*. 2023. V. 49. N 24. Part A. P. 40532–40540. doi: 10.1016/j.ceramint.2023.10.031
30. 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. doi: 10.1002/adom.201801663
31. Niu L., Shi H., Ye Y., Liu C., Jia B., Chu Y., et al. Optimized tellurite glasses containing CsPbBr_3 -quantum dots for white-light emitting diodes // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2022. V. 581. P. 121429. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2022.121429
32. Kolobkova E.V., Semaan R., Kuznetsova M.S., Nikonov N.V. High-temperature photoluminescence of CsPbBr_3 perovskite nanocrystals in the fluorophosphate glasses // *Journal of Luminescence*. 2023. V. 255. P. 119541. doi: 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. N 12. P. 124501. doi: 10.1063/5.0227459
34. Kolobkova E.V., Kuznetsova M.S., Nikonov N. Perovskite CsPbX_3 ($\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) Nanocrystals in fluorophosphate glasses // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021. V. 563. P. 120811. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2021.120811
35. 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 $\text{CsPb}(\text{Cl}, \text{Br})_3$ perovskite nanocrystals in a glass matrix // *Physical Review B*. 2024. V. 109. N 23. P. 235301. doi: 10.1103/physrevb.109.235301
36. Kolobkova E.V., Nikonov N.V., Kuznetsova M.S., Bataev M.N. Controlling the luminescence of CdSe quantum dots in the fluorinephosphate glass // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2024. V. 646. P. 123248. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2024.123248
37. 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. doi: 10.1016/S0955-2219(98)00333-1
38. 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. doi: 10.1134/s1087659608040020
39. Vaynberg B., Matusovsky M., Rosenbluh M., Kolobkova E., Lipovskii A. High optical nonlinearity of $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ microcrystals in
22. Shao H., Bai X., Cui H., Pan G., Jing P., Qu S., et al. White light emission in $\text{Bi}^{3+}/\text{Mn}^{2+}$ ion co-doped CsPbCl_3 perovskite nanocrystals. *Nanoscale*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 1023–1029. doi: 10.1039/c7nr08136g
23. Mondal N., De A., Samanta A. Achieving near-unity photoluminescence efficiency for blue-violet-emitting perovskite nanocrystals. *ACS Energy Letters*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 32–39. doi: 10.1021/acseenergylett.8b01909
24. Niu W., Chen R.H., Pang T., Zheng Y.H., Wu T., Zhang R., et al. Boosting hot carrier cooling in halide perovskite quantum dots via Ni^{2+} doping. *Advanced Optical Materials*, 2024, vol. 12, no. 19, pp. 2400307. doi: 10.1002/adom.202400307
25. Chen D., Fang G.L., Chen X. Silica-coated Mn-doped $\text{CsPb}(\text{Cl}/\text{Br})_3$ inorganic perovskite quantum dots: exciton-to-Mn energy transfer and blue-excitable solid-state lighting. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2017, vol. 9, no. 46, pp. 40477–40487. doi: 10.1021/acsami.7b14471
26. Chen W., Shi T.C., Du J., Zang Z., Yao Z., Li M., et al. Highly stable silica-wrapped Mn-doped CsPbCl_3 quantum dots for bright white light-emitting devices. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2018, vol. 10, no. 50, pp. 43978–43986. doi: 10.1021/acsami.8b14046
27. Liu M., Jiang N., Huang H., Lin J., Huang F., Zheng Y., et al. Ni^{2+} -doped CsPbI_3 perovskite nanocrystals with near-unity photoluminescence quantum yield and superior structure stability for red light-emitting devices. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 413, pp. 127547. doi: 10.1016/j.cej.2020.127547
28. Zhou Y., Liu C., Zhao Z., Zhang W., Li K., Ye Y., et al. Enhanced luminescence of Mn doped CsPbCl_3 and $\text{CsPb}(\text{Cl}/\text{Br})_3$ perovskite nanocrystals stabilized in glasses. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 827, pp. 154349. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154349
29. Song L., Zhang X., Zhang H., Xu S., Zhang J., Wang Y., et al. Improving luminescence characteristics of Ni^{2+} doped CsPbX_3 ($\text{X} = \text{Br}/\text{I}$) quantum dots in borogermanate glass for wide color gamut display. *Ceramics International*, 2023, vol. 49, no. 24, part A, pp. 40532–40540. doi: 10.1016/j.ceramint.2023.10.031
30. 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. doi: 10.1002/adom.201801663
31. Niu L., Shi H., Ye Y., Liu C., Jia B., Chu Y., et al. Optimized tellurite glasses containing CsPbBr_3 -quantum dots for white-light emitting diodes. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2022, vol. 581, pp. 121429. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2022.121429
32. Kolobkova E.V., Semaan R., Kuznetsova M.S., Nikonov N.V. High-temperature photoluminescence of CsPbBr_3 perovskite nanocrystals in the fluorophosphate glasses. *Journal of Luminescence*, 2023, vol. 255, pp. 119541. doi: 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, no. 12, pp. 124501. doi: 10.1063/5.0227459
34. Kolobkova E.V., Kuznetsova M.S., Nikonov N. Perovskite CsPbX_3 ($\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) Nanocrystals in fluorophosphate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2021, vol. 563, pp. 120811. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2021.120811
35. 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 $\text{CsPb}(\text{Cl}, \text{Br})_3$ perovskite nanocrystals in a glass matrix. *Physical Review B*, 2024, vol. 109, no. 23, pp. 235301. doi: 10.1103/physrevb.109.235301
36. Kolobkova E.V., Nikonov N.V., Kuznetsova M.S., Bataev M.N. Controlling the luminescence of CdSe quantum dots in the fluorinephosphate glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2024, vol. 646, pp. 123248. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2024.123248
37. 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. doi: 10.1016/S0955-2219(98)00333-1
38. 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. doi: 10.1134/s1087659608040020
39. Vaynberg B., Matusovsky M., Rosenbluh M., Kolobkova E., Lipovskii A. High optical nonlinearity of $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ microcrystals in

fluorine-phosphate glass // Optics Communications. 1996. V. 132. N 3-4. P. 307–310. doi: 10.1016/0030-4018(96)00373-2

fluorine-phosphate glass. *Optics Communications*, 1996, vol. 132, no. 3-4, pp. 307–310. doi: 10.1016/0030-4018(96)00373-2

Авторы

Воробьев Михаил Викторович — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0002-7692-8449>, Mikhailvorobiev1400@yandex.ru

Швец Егор Вадимович — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0007-5100-852X>, 6214465@gmail.com

Кузьменко Наталья Константиновна — младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57216750549](https://orcid.org/0000-0002-7213-8231), <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), <https://orcid.org/0000-0002-0134-8434>, kolobok106@rambler.ru

Authors

Mikhail V. Vorobev — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0002-7692-8449>, Mikhailvorobiev1400@yandex.ru

Egor V. Shvets — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0007-5100-852X>, 6214465@gmail.com

Nataliya K. Kuzmenko — Junior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57216750549](https://orcid.org/0000-0002-7213-8231), <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; Leading Researcher, 190013, Russian Federation; ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57604636700](https://orcid.org/0000-0002-0134-8434), <https://orcid.org/0000-0002-0134-8434>, kolobok106@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 27.10.2025

Одобрена после рецензирования 05.05.2026

Принята к печати 25.07.2026

Received 27.10.2025

Approved after reviewing 05.05.2026

Accepted 25.07.2026



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»