

УДК 544.77

КОНТРОЛИРУЕМАЯ МОДИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРОВСКИТНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ CsPbBr_3 ПОСРЕДСТВОМ ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИХ ПОВЕРХНОСТИ

© 2025 г. Д. Г. Гулевич^{a, *}, И. Р. Набиев^{a, b}, П. С. Самохвалов^a^a Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия^b Лаборатория по исследованиям в области нанонаук (LRN-EA4682), Университет Реймса, Шампань-Арденны, Реймс, 51100 Франция

*E-mail: dayana_gulevich@mail.ru

Поступила в редакцию 30.05.2023 г.

После доработки 06.06.2023 г.

Принята к публикации 12.06.2023 г.

Неорганические перовскитные нанокристаллы (ПНК) состава CsPbBr_3 в настоящее время находят широкое применение в различных областях фотоники. Однако, помимо таких уникальных оптических свойств, как высокая эффективность флуоресценции, интенсивное поглощение света, настраиваемая ширина запрещенной зоны, соответствующая эмиссии видимого света, для ПНК характерен высоко динамичный характер связывания поверхностных органических лигандов, что приводит к снижению квантового выхода (КВ) флуоресценции, коллоидной стабильности и структурной целостности нанокристаллов при их очистке, хранении, или использовании в различных устройствах. В настоящей работе показано, что указанная проблема может быть решена путем постсинтетической обработки поверхности нанокристаллов CsPbBr_3 при проведении реакции частичной замены десорбированных исходных лигандов, олеиновой кислоты и олеиламина, на более короткоцепочечные алкиламмониевые лиганды диметилдидодециламмоний бромида (ДДАБ) и формамидиний бромида. Проведенные эксперименты показали, что обработка поверхности ПНК состава CsPbBr_3 раствором ДДАБ и бромида свинца позволяет повысить величину КВ исходных ПНК с 67 до 95%.

Ключевые слова: неорганические перовскитные нанокристаллы, химия поверхности, органические лиганды, фотолюминесценция, квантовый выход

DOI: 10.56304/S207956292405018X

ВВЕДЕНИЕ

Нанокристаллы металл-галогенидных перовскитов (ПНК) с общей формулой ABX_3 , где А — одновалентный катион (Cs^+ , CH_3NH_3^+ и др.), В — двухвалентный катион (Pb^{2+} , Ca^{2+} , Ge^{2+} , Sn^{2+} и т.д.), а X — галогенид- или псевдогалогенид-анион, обладают рядом оптимальных электрофизических свойств, среди которых настраиваемая ширина запрещенной зоны во всем диапазоне эмиссии видимого света, высокие величины квантового выхода (КВ) фотолюминесценции (ФЛ) и подвижности зарядов, малая ширина максимума ФЛ на полувисоте, и гораздо меньшая плотность состояния поверхностных ловушек по сравнению с полупроводниками других классов [1–5]. Совокупность этих характеристик обуславливает широкий спектр применения металл-галогенидных перовскитов как материалов для светоизлучающих диодов, оптических сенсоров, фотокатализаторов, солнечных ячеек, и т.д. [6–9]. Одной из перспективных областей применения ПНК является со-

здание на их основе детекторов ионизирующего излучения в формате сцинтилляционных материалов [10, 11] или твердотельных детекторов [12]. В зависимости от области применения перовскиты ABX_3 синтезируют как физическими [13, 14], так и химическими методами (инжекционный и неинжекционный коллоидный синтез, механохимический, гидротермальный синтез и т.д.) [15–19]. Наиболее распространенным и перспективным подходом является коллоидный синтез методом горячей инъекции, варьирование условий которого позволяет с высокой воспроизводимостью получать ПНК ABX_3 заданной структуры и отличными оптическими свойствами. Однако, на стадии выделения синтезированных нанокристаллов из реакционной среды и их очистки, исходные органические лиганды частично десорбируются с поверхности нанокристаллов, что приводит к снижению коллоидной стабильности и структурной целостности ПНК. Кроме того, некоординированные атомы на поверхности нанокристаллов

могут образовывать ловушечные энергетические состояния, наличие которых приводит к усилению безызлучательной рекомбинации зарядов, вследствие чего снижается эффективность ФЛ. Наиболее часто при коллоидном синтезе перовскитных нанокристаллов в качестве поверхностных стабилизаторов используют олеиламин и олеиновую кислоту [15]. Характер связывания этих лигандов с поверхностью ПНК имеет высокую динамичность, и в случае кубических нанокристаллов CsPbBr_3 до 65% молекул, связанных с поверхностью, подвергается быстрому обмену со свободными лигандами в растворе [20, 21].

Таким образом, решение проблемы снижения стабильности структурных и оптических характеристик перовскитных нанокристаллов является чрезвычайно актуальной и важной задачей. К настоящему моменту в литературе описан ряд подходов к решению данной проблемы путем постсинтетической модификации поверхности ПНК через замену исходных лигандов на альтернативные, с варьированием функциональных групп и длины углеродной цепи [22–24], а также создание на поверхности нанокристаллов неорганических (SiO_x , TiO_y , Cs_4PbBr_6 , боросиликатов, тетрафтороборатов, галогенидов, псевдогалогенидов и др.) [25–29] и полимерных [30–33] оболочек. Так, например, Zhong et al. [26] повысили квантовый выход исходных ПНК на 77% путем создания структур по типу ядро-оболочка $\text{CsPbBr}_3/\text{SiO}_2$. Инкапсуляция перовскитных нанокристаллов CsPbBr_3 в толстую (до 25 нм) оболочку сополимера малеинового ангидрида и 1-октадецена позволила повысить величину квантового выхода до 89%, а также обеспечить долговременную стабильность при воздействии разрушающих факторов внешней среды (влаги, света, кислорода воздуха) [34]. Dutt et al. [35] путем постсинтетической обработки ПНК бензойной кислотой, осуществили пассивацию поверхностных дефектов CsPbBr_3 через координацию карбоксильных групп бензойной кислоты с поверхностными атомами свинца. Модифицированные образцы обладали долговременной (более года) стабильностью оптических характеристик, а при непрерывном воздействии УФ-излучения в течение 24 часов сохраняли до 36% исходной интенсивности ФЛ, в то время как у исходных образцов ПНК за это время происходило полное тушение ФЛ [35]. Обработка ПНК состава CsPbI_3 2,2'-иминодиперфторбензойной кислотой за счет более прочного связывания бидентантного лиганда с поверхностью, по сравнению с монодентантной олеиновой кислотой, позволяет предотвратить фазовый переход CsPbI_3 в неперовскитную фазу. Также авторами работы [36] была показана возможность увеличения КВ ФЛ модифицированных образцов от 60 до 90% с сохранением данной величины в течение

15 дней, в то время для исходных ПНК наблюдалось тушение ФЛ в течение 5 дней.

В настоящей работе для решения задачи повышения коллоидной стабильности и оптических свойств ПНК состава CsPbBr_3 показана реализация метода постсинтетической модификации их поверхности путем обработки нанокристаллов растворами диметилдидодециламмоний бромидом (ДДАБ) и формаидиний бромидом (ФАБР).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Получение ПНК CsPbBr_3

Все реактивы, указанные в методике, были использованы без дополнительной очистки. Перовскитные нанокристаллы состава CsPbBr_3 получали методом горячей инъекции в неполярном растворителе с использованием в качестве основы методики из работы [15]. При данном подходе синтез включает в себя две стадии. На первом этапе в трехгорлую круглодонную колбу помещали 25 ммоль Cs_2CO_3 (99,9%, Sigma-Aldrich), 4 мл 1-октадецена (ОДЕ, техн., 90%, Sigma-Aldrich) и 250 мкл олеиновой кислоты (ОК, 98%, Sigma-Aldrich). Реакционную смесь вакуумировали в течение 1 ч при 120°C и интенсивном перемешивании на магнитной мешалке. Далее температуру повышали до 150°C и продолжали перемешивание в токе Ar еще 1.5 ч до полного растворения карбоната цезия. При этом цвет реакционной смеси изменяется от светло-желтого до темно-коричневого. На второй стадии синтеза в трехгорлую колбу помещали 1.1 ммоль PbBr_2 (99.999%, Sigma-Aldrich), 29.5 мл ОДЕ, а также по 3 мл олеиновой кислоты (98%, Sigma-Aldrich) и олеиламина (техн., 70%, Sigma-Aldrich). Реакционную смесь вакуумировали в условиях, аналогичных первой стадии. Перед инъекцией включали ток аргона, температуру поднимали до 180°C, а приготовленный ранее 0.125 М прекурсор цезия нагревали до 120°C для снижения вязкости раствора. Объем олеата цезия отбирали таким образом, чтобы соотношение $[\text{Cs}^+] : [\text{Pb}^{2+}]$ в реакционной смеси составляло 1 : 3.8. После инъекции реакционную колбу быстро охлаждали в ледяной воде. Для выделения ПНК CsPbBr_3 из реакционной среды, первичный раствор переносили в центрифужные пробирки объемом 2 мл и осаждали центрифугированием в течение 5 мин при 10000 об/мин. Далее осадок растворяли в толуоле под действием ультразвука в течение 15 мин и осаждали метилацетатом в объемном отношении 1 : 2 при центрифугировании в тех же условиях. После чего ПНК перерастворяли в толуоле под действием ультразвука и снова центрифугировали без коагулирования раствора. Для лучшей очистки, раствор ПНК фильтровали на политетрафторэтиленовом фильтре с размером пор 200 нм.

Таблица 1. Оптические свойства исходных ПНК CsPbBr₃ и модифицированных образцов

Образец	Состав модификатора	$\lambda_{\text{макс}}$, нм	КВ, %	ФЛ FWHM, нм
Образец 1	—	513	67	19.5
Образец 2	ДДАБ	512	82	21.4
Образец 3	ФАБР	512	59	20.3
Образец 4	ФАБР + ОК	513	53	20.3
Образец 5	ДДАБ + ОК	512	81	20.9
Образец 6	ДДАБ + PbBr ₂	514	95	19.2

Постсинтетическая обработка ПНК CsPbBr₃

Постсинтетическую обработку поверхности полученных ПНК CsPbBr₃ проводили двумя типами органических поверхностных стабилизаторов: диметилдидодециламмоний бромидом (ДДАБ, Sigma-Aldrich (США), 99.9%) и формамидиний бромидом (ФАБР, Sigma-Aldrich (США), 99.9%). Также были выполнены серии экспериментов, в которых ДДАБ и ФАБР использовали в смеси с олеиновой кислотой. Для замены лигандной оболочки к 1 мл растворов ПНК CsPbBr₃ в толуоле с концентрацией 15 мг/мл добавляли рассчитанные количества 0.05 и 0.07 М растворов ДДАБ и ФАБР, соответственно, в толуоле. К двум таким же образцам дополнительно добавляли 26 и 65 мкл олеиновой кислоты. Растворы перемешивали на магнитной мешалке в течение часа при комнатной температуре, а затем проводили процедуру очистки и выделения ПНК, описанную выше. Также была проведена серия экспериментов по обработке перовскитных нанокристаллов смесью ДДАБ и PbBr₂ в молярном соотношении 2 : 1. Бромид свинца в данном случае способствовал увеличению растворимости диметилдидодециламмоний бромида [1]. Раствор получали перемешиванием на магнитной мешалке в течение 3 ч при нагреве на водяной бане до 50°C.

Методы исследования полученных образцов

Для съемки спектров поглощения и ФЛ исходных и модифицированных ПНК CsPbBr₃ использовали спектрофотометр Agilent Cary 60 и спектрофлуориметр Agilent Cary Eclipse, соответственно. Квантовый выход перовскитных нанокристаллов измеряли относительно флуоресцеина.

Состав поверхности полученных образцов характеризовали методом ИК-Фурье спектроскопии на инфракрасном Фурье-спектрометре Shimadzu FTIR-8400S. Спектры в режиме пропускания измеряли в таблетке безводного KBr в диапазоне волновых чисел 400–4000 см⁻¹ с шагом 0.5 см⁻¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Образцы коллоидных перовскитных нанокристаллов CsPbBr₃ (образец 1), полученные методом горячей инъекции, обладают достаточно высоким КВ и малой шириной максимума ФЛ на полувысоте (табл. 1). С целью дальнейшего улучшения оптических характеристик ПНК была проведена серия экспериментов по модификации поверхности CsPbBr₃. Обработку проводили растворами ДДАБ и ФАБР (образцы 2 и 3, соответственно). Для протонирования олеиламина и его более эффективной десорбции с поверхности ПНК к растворам ФАБР и ДДАБ была добавлена олеиновая кислота (ОК, образцы 4 и 5). Также для повышения растворимости ДДАБ в толуоле, раствор модификатора был приготовлен в смеси с бромидом свинца в молярном соотношении 2 : 1 (образец 6). Оптические свойства полученных образцов суммированы в табл. 1. На рис. 1 приведены спектры поглощения и нормированные спектры ФЛ образцов 1–6. По параметрам полученных спектров можно сделать вывод о том, что модификация поверхности в выбранных условиях не приводит к изменению спектральных свойств и фазового состава ПНК CsPbBr₃. Так, в спектрах поглощения отсутствуют максимумы в области 312 нм, соответствующие фазе CsPb₄Br₆ [37].

Согласно полученным данным, обработка поверхности ПНК состава CsPbBr₃ раствором ФАБР, как в индивидуальном виде, так и в смеси с олеиновой кислотой (ОК), приводит к снижению квантового выхода ФЛ по сравнению с исходными образцами – от 67 до 59 и 53%, соответственно. По видимому, молекулы ФАБР, не обеспечивают достаточное для предотвращения агрегации коллоидов пространственное разделение наночастиц, которое в случае добавления ОК составляет более 1.5 нм [38], и возможный эффект от компенсации вакансий брома при обработке раствором ФАБР нивелируется. Обработка всеми модификаторами, содержащими ДДАБ, приводит к значительному увеличению значения квантового выхода ФЛ CsPbBr₃ (табл. 1). Добавление олеиновой кислоты при этом не оказывает заметного влияния.

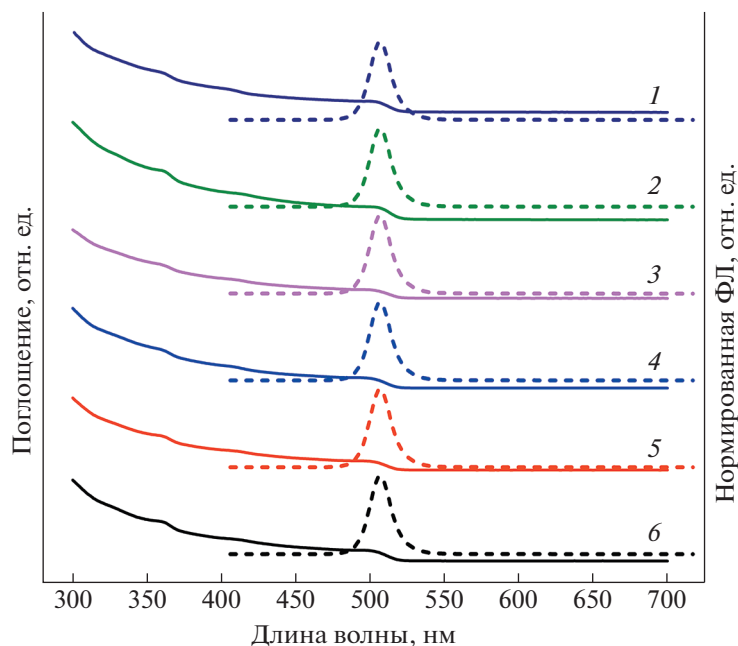


Рис. 1. Нормированные спектры фотолюминесценции и поглощения полученных образцов.

Химический состав поверхности исходного образца ПНК и образца, поверхность которого была модифицирована ДДАБ, был проанализирован методом ИК-спектроскопии (рис. 2). В спектрах обоих образцов присутствуют колебания метиленых и метиленовых групп при 1404 см^{-1} , а также в диапазонах $717\text{--}1089$ и $2829\text{--}3000$, полосы олеиновой кислоты при 1468 и 1638 см^{-1} , соответствующие колебаниям групп COO^- и $\text{C}=\text{C}$, соответственно, а также уширенный пик в диапазоне $3080\text{--}3682\text{ см}^{-1}$, являющийся наложением симметричных колебаний связей N-H и O-H [39]. Подтверждением факта связывания DDA^+ с поверхностью CsPbBr_3 является отсутствие в спектре модифицированного образца небольшого пика 3009 см^{-1} (C-H при двойной связи), а также колебания C=O группы при 1533 см^{-1} , которые, в свою очередь, отчетливо проявляются в спектрах исходных перовскитных нанокристаллов.

Наибольшее повышение КВ ФЛ (до значения 95%) было обнаружено в случае образца 6, полученного модификацией поверхности ПНК раствором ДДАБ в смеси с бромидом свинца. Эффективность диметилдидодециламмоний бромида может быть объяснена совокупностью следующих факторов:

(i) ДДАБ обеспечивает двойной эффект пассивации поверхности. Катион DDA^+ прочно связывается с А-сайтом, перовскита, анион Br^- при этом участвует в восстановлении поврежденных октаэдров PbBr_6 [40];

(ii) ДДАБ является более короткоцепочечным лигандом, по сравнению с олеиновой кислотой и олеиламином, что способствует более эффективному транспорту носителей заряда;

(iii) стерическим фактором, заключающимся в том, что молекула ДДАБ содержит две алкильные цепи, что позволяет образовывать стабильный плотный монослой лигандов на поверхности ПНК.

Также к числу достоинств данного лиганда, можно отнести то, что в отличие от пары олеиламин – олеиновая кислота, форма существования DDA^+ в растворе не зависит от pH среды, что снижает число конкурирующих реакций в растворе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе, с использованием метода горячей инъекции были получены образцы ПНК состава CsPbBr_3 . С целью повышения коллоидной и оптической стабильности были проведены эксперименты по постсинтетической модификации поверхности синтезированных ПНК в разных условиях, с выбором в качестве замещающих лигандов бромидов диметилдидодециламмония и формамидиния. Оба лиганда оказались весьма перспективными в направлении компенсации вакансий бромид-ионов, которые оказывают критическое влияние на эффективность фотолюминесценции ПНК состава CsPbBr_3 . Однако, в случае ФАБР, размеры лиганда оказались недостаточными для создания эффективного стабилизирующего органического слоя. Наилучшие результаты были получены при обработке перовскитных нанокри-

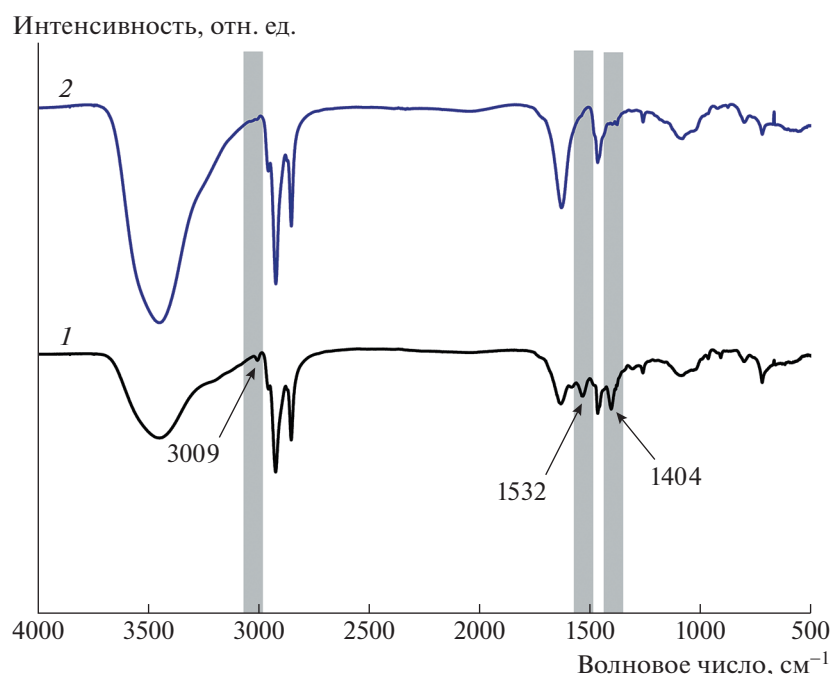


Рис. 2. ИК-спектры образцов ПНК CsPbBr₃ (образец 1) и ПНК CsPbBr₃, поверхность которого была модифицирована ДДАБ (образец 2).

сталлов раствором смеси ДДАБ и бромида свинца, при которой квантовый выход исходных ПНК увеличивался от 67 до 95%. Обнаруженный эффект объясняется совокупностью химических свойств и особенностей структуры диметилдидециламмоний бромида. Полученные результаты открывают путь к повышению стабильности коллоидов ПНК состава CsPbBr₃, улучшению их оптических характеристик и, следовательно, к повышению эффективности оптоэлектронных устройств на их основе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2021-1413.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Bodnarchuk M.I., Boehme S., Ten Brinck S., et al. // *ACS Energy Lett.* 2019. V. 4 (1). P. 63–74.
2. Akkerman Q.A., Gandini M., Di Stasio F., et al. // *Nat. Energy.* 2016. V. 2 (2). P. 16194.
3. Agrawal K., Hasan S., Blawat J., et al. // *Chemosensors.* 2022. V. 10 (9). P. 369.
4. Green M.A., Jiang Y., Soufiani A.M., et al. // *J. Phys. Chem. Lett.* 2015. V. 6 (23). P. 4774–4785.
5. Yetlapu G.R., Talukdar D., Sarkar S., et al. // *Nano Lett.* 2016. V. 16 (8). P. 4838–4848.
6. Yakunin S., Protesescu L., Krieg F., et al. // *Nat. Commun.* 2015. V. 6 (1). P. 8056.
7. Yang M., Moroz P., Miller E., et al. // *ACS Photonics.* 2020. V. 7 (1). P. 154–164.
8. He Y., Petryk M., Liu Z., et al. // *Nat. Photonics.* 2021. V. 15 (1). P. 36–42.
9. Dong Q., Fang Y. // *Light Sci. Appl.* 2023. V. 12 (1). P. 8.
10. Chen Q., Wu J., Ou X., et al. // *Nature.* 2018. V. 561 (7721). P. 88–93.
11. Heo J.H., Shin D.H., Park J.K., et al. // *Adv. Mater.* 2018. V. 30 (40). P. 1801743.
12. Wei H., Huang J. // *Nat. Commun.* 2019. V. 10 (1). P. 1066.
13. Mo X., Li X., Dai G., et al. // *Nanoscale.* 2019. V. 11 (44). P. 21386–21393.
14. Tian C., Wang F., Wang Y., et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2019. V. 11 (17). P. 15804–15812.
15. Protesescu L., Yakunin S., Bodnarchuk M.I., et al. // *Nano Lett.* 2015. V. 15 (6). P. 3692–3696.
16. Ng C.K., Yin W., Li H., et al. // *Nanoscale.* 2020. V. 12 (8). P. 4859–4867.
17. Wang L., Ma D., Guo C., et al. // *Appl. Surf. Sci.* 2021. V. 543. P. 148782.
18. Van Embden J., Chesman A.S.R., Jasieniak J.J. // *Chem. Mater.* 2015. V. 27 (7). P. 2246–2285.
19. Kayalvizhi T., Sathya A., Preethi Meher K.R.S. // *J. Electron. Mater.* 2022. V. 51 (7). P. 3466–3475.
20. De Roo J., Ibáñez M., Geiregat P., et al. // *ACS Nano.* 2016. V. 10 (2). P. 2071–2081.
21. Hills-Kimball K., Yang H., Cai T., et al. // *Adv. Sci.* 2021. V. 8 (12). P. 2100214.
22. Wang F., Geng W., Zhou Y., et al. // *Adv. Mater.* 2016. V. 28 (45). P. 9986–9992.

23. Zheng C., Bi C., Huang F., et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2019. V. 11 (28). P. 25410–25416.
24. Yang D., Li X., Zhou W., et al. // Adv. Mater. 2019. P. 1900767.
25. Koscher B.A., Swabeck J.K., Bronstein N.D., et al. // J. Am. Chem. Soc. 2017. V. 139 (19). P. 6566–6569.
26. Zhong Q., Cao M., Hu M., et al. // ACS Nano. 2018. V. 12 (8). P. 8579–8587.
27. Li Z., Hofman E., Li J., et al. // Adv. Funct. Mater. 2018. V. 28 (1). P. 1704288.
28. Ahmed T., Seth S., Samanta A. // Chem. Mater. 2018. V. 30 (11). P. 3633–3637.
29. Wu Y., Wei C., Li X., et al. // ACS Energy Lett. 2018. V. 3 (9). P. 2030–2037.
30. Zhang Z., Liu L., Huang H., et al. // Appl. Surf. Sci. 2020. V. 526. P. 146735.
31. Boussoufi F., Pousthomis M., Kuntzmann A., et al. // ACS Appl. Nano Mater. 2021. V. 4 (7). P. 7502–7512.
32. Cai Y., Zhang P., Bai W., et al. // ACS Sustain. Chem. Eng. 2022. V. 10 (22). P. 7385–7393.
33. Kim H., So S., Ribbe A., et al. // Chem. Commun. 2019. V. 55 (12). P. 1833–1836.
34. Wu H., Wang S., Cao F., et al. // Chem. Mater. 2019. V. 31 (6). P. 1936–1940.
35. Dutt V.G.V., Akhil S., Singh R., et al. // J. Phys. Chem. C. 2022. V. 126 (22). P. 9502–9508.
36. Pan J., Shang Y., Yin J., et al. // J. Am. Chem. Soc. 2018. V. 140 (2). P. 562–565.
37. Lian X., Wang X., Ling J., et al. // Adv. Funct. Mater. 2019. V. 29 (5). P. 1807345.
38. Talapin D.V., Lee J.-S., Kovalenko M., et al. // Chem. Rev. 2010. V. 110 (1). P. 389–458.
39. Nakamoto K. // Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds. 1986. New York: Wiley.
40. Stelmakh A., Aebli M., Baumketner A., et al. // Chem. Mater. 2021. V. 33 (15). P. 5962–5973.

Controlled Modification of the Optical Properties of CsPbBr₃ Perovskite Nanocrystals by Surface Chemical Treatment

D. G. Gulevich^{1, *}, I. R. Nabiev^{1, 2}, and P. S. Samokhvalov¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

²Laboratoire de Recherche en Nanosciences (LRN-EA4682), Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, 51100 France

*e-mail: dayana_gulevich@mail.ru

Received May 30, 2023; revised June 6, 2023; accepted June 12, 2023

Abstract—CsPbBr₃ inorganic perovskite nanocrystals (PNCs) are widely used in various fields of photonics today. However, apart from their unique optical properties, such as a high fluorescence efficiency, intense light absorption, and a tunable bandgap width corresponding to visible light emission, PNCs are characterized by highly dynamic binding of organic surface ligands, which leads to a decrease in the fluorescence quantum yield (QY), colloidal stability, and structural integrity during PNC purification, storage, and use in various devices. This shows that this problem can be solved by postsynthetic surface treatment of CsPbBr₃ nanocrystals consisting in partial replacement of desorbed initial oleic acid and oleylamine with shorter-chain alkylammonium ligands, dimethyldodecylammonium bromide (DDAB) and formidinium bromide. Experiments have shown that the treatment of the CsPbBr₃ PNC surface with a solution of DDAB and lead bromide increases the QY of PNC fluorescence from 67 to 95%.

Keywords: inorganic perovskite nanocrystals, surface chemistry, organic ligands, photoluminescence, quantum yield