

УДК 621.
EDN: EOALOY

PACS: 85.60.–g

Получение коллоидных квантовых точек PbSe и тонких пленок на их основе с использованием раствора селена в децене-1© И. А. Шуклов*, Т. Миленкович, О. В. Вершинина, Н. В. Дубровина, О. А. Сапцова,
В. С. Попов, В. В. Иванов*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия
* E-mail: shuklov.ia@mipt.ru**Статья поступила в редакцию 29.11.2024; после доработки 4.02.2025; принята к публикации 10.02.2025
Шифр научной специальности: 1.3.11*

Разработан новый метод получения коллоидных квантовых точек селенида свинца с использованием раствора серого селена в децене-1. Исследована зависимость размера, распределения по размерам и спектральных характеристик коллоидных квантовых точек PbSe от температуры реакции. Для образцов проведена характеристика кристаллической фазы и лигандной оболочки. Из полученных образцов были получены тонкие пленки и определена их морфология. Была изучена кинетика замены исходной лигандной оболочки на роданид и йодид анионы в тонких пленках и определено время максимального замещения для исследованных систем. На основе полученных коллоидных материалов на золотых встречно-штыревых электродах была получена фото-чувствительная структура.

Ключевые слова: селенид свинца; высокотемпературный коллоидный синтез; прекурсор; квантовые точки.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-3-34-41

Коллоидные квантовые точки (ККТ) являются перспективными наноматериалами для создания биометок, лазеров, солнечных батарей, фотодетекторов, и светодиодов. Эти коллоидные наноматериалы имеют большие перспективы для применений благодаря возможности простого перестраивания спектрального диапазона чувствительности и удобству нанесения золь на различные подложки. Эти особенности делают их особенно привлекательными для применения в области электроники, включая создание фотодетекторов [1, 2]. Нобелевская премия по химии 2023 года была присуждена за выдающиеся достижения в области разработки и применения коллоидных квантовых точек, что открыло новые перспективы в различных областях науки и технологии [3].

Коллоидные наноматериалы могут стать экономичной альтернативой традиционным эпитаксиальным материалам для детекторов инфракрасного диапазона, таким как HgCdTe и InSb. В настоящее время разработано несколько типов коллоидных нанокристаллов, способных покрывать различные участки инфракрасного спектра, включая ближний [4], средний [5] и дальний ИК-диапазоны [6].

Для получения коллоидных нанокристаллов селенидов, таких как CdSe, PbSe или HgSe наиболее часто используется раствор триоктилфосфин селенида в триоктилфосфине [7, 8]. Данный реагент получается при растворении элементарного селена в триоктилфосфине. Исходный фосфин при этом доступен в техническом качестве с содержанием основного вещества порядка 90 %. Низкая воспро-

изводимость синтезов коллоидных нанокристаллов с этим прекурсором, является следствием варьирующегося состава примесей в нем. В частности, диоктилфосфин является типичной плохо отделяемой примесью при синтезе триоктилфосфина через реактив Гриньяра и PCl_3 [9]. В условиях синтеза прекурсора, это примесное вещество образует более реакционноспособный в синтезе наночастиц селенидов диоктилфосфина селенид. Таким образом скорость образования наночастиц селенидов может существенно отличаться с разными партиями триоктилфосфина в зависимости от концентрации в нём высоко-реакционноспособных примесей [10]. Важным фактором является также необходимость в импортозамещении триоктилфосфина, который не производится российской химической промышленностью.

В рамках работ по исследованию синтеза и свойств коллоидных квантовых точек халькогенидов тяжелых металлов [11, 12], проводимых в нашей группе, возникла необходимость в разработке более совершенных прекурсоров халькогенов для синтеза наночастиц. Особый внимание было уделено прекурсорам на основе химических реактивов российского производства.

Ранее нами были предложен новый прекурсор селена на основе децена-1 [13]. С его помощью были успешно получены коллоидные квантовые точки HgSe с средним диаметром от 5 до 7 нм. В рамках представленной работы данный прекурсор был исследован синтезе ККТ PbSe с его использованием.

Прекурсор реагирует с раствором олеата свинца при температурах от 80 °С с образова-

нием темно окрашенных зольей селенида свинца. При температурах от 100 °С до 120 °С нам удалось получить образцы с четко выраженными экситонными пиками с положением максимума от 1173 нм до 1366 нм [14]. При этом значение полуширины экситонного пика (FWHM) оставалось практически неизменным для образцов наночастиц, полученных при вышеуказанных температурах, и равнялось ~120 нм. Образец полученный при 150 °С не обладал выраженным экситонным пиком (рис. 1).

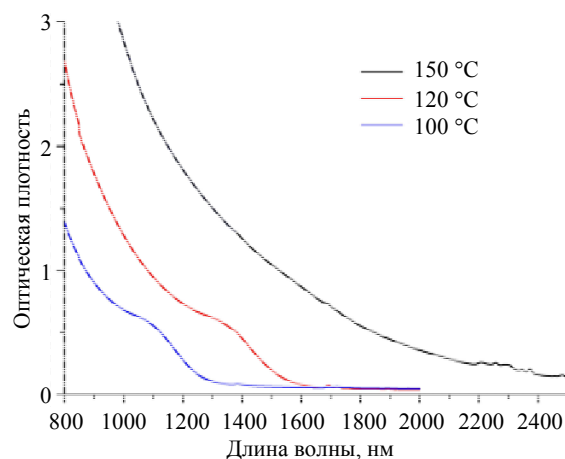


Рис. 1. Изменение спектра поглощения образцов ККТ PbSe в зависимости от температуры синтеза

Полученные при 150 °С нанокристаллы обладают смешанной формой вида нанокубов и усеченных октаэдров со средним размером порядка 11 нм (рис. 2). Переход от кинетически выгодных сферических частиц PbSe к термодинамически предпочтительным нанокубам характерен для наночастиц селенида свинца при размерах свыше 9 нм [15]. С исходной олеатной оболочкой частицы не агрегированы.

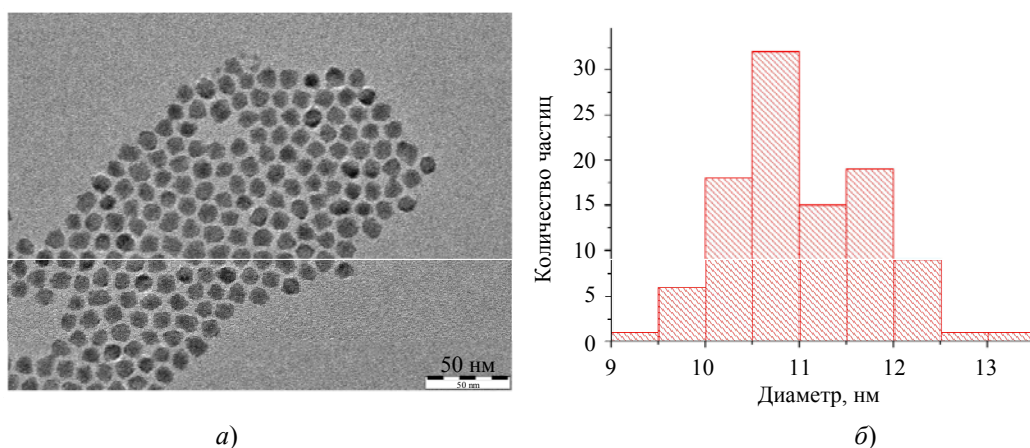


Рис. 2. а) – микрофотография ПЭМ и б) – гистограмма распределения по размерам ККТ PbSe , полученных при 150 °С

Форма SAED (Selected Area Electron Diffraction) типична для поликристаллических образцов с равномерным распределением по площади образца (рис. 3а). В SAED наблюдаются кольца рефлексов от плоскостей (111), (200), (220), (222), (400), (420) с межплоскостными расстояниями характерными для клаусталита и кубической сингонии [16]. В ИК-спектре наблюдаются сигналы лигандной оболочки, состоящей из олеиламина (рис. 3б) [17].

На основе полученных ККТ PbSe были получены тонкие пленки. На приставке многократного нарушенного внутреннего отражения была изучена скорость замены исходной лигандной оболочки на йодид и роданид ионы с использованием тетрабутиламмония йодида и роданида аммония в качестве замещающих реагентов соответственно. Для этого модельные тонкие пленки были получены испарением золь непосредственно на германиевой пластине приставки. Использование МНПВО [18, 19] для отслеживания процесса замены позволяет достичь очень высокую чувствительность при наблюдении процесса замены в образцах пленок, при этом максимально приближенном по своим параметрам к используемым при создании фотодетекторов.

Замещение олеатных лигандов в тонкой пленке ККТ PbSe йодид-анионами проводилось с использованием раствора тетрабутиламмония йодида в формамиде (рис. 4). Изменения в диапазоне $3000\text{--}2800\text{ см}^{-1}$, где находятся сигналы валентных трансформаций

C-H связей, показывают, что максимальное возможное замещение исходной оболочки происходит после 3 минут взаимодействия с замещающим раствором. Наблюдается падение интенсивности на 90 % и дальнейшего изменения сигналов при более длительном контакте с замещающим раствором не происходит. Также наблюдается рост интенсивности сигналов адсорбированного на поверхности наночастиц формамида, в частности карбонильной группы.

Замещение олеатных лигандов в тонкой пленке ККТ PbSe роданид-анионами проводилось с использованием роданида аммония в изопропанол. По данным ИК-спектromетрии эта трансформация происходит быстрее, чем с йодид ионом. Уже через минуту наблюдается исчезновение сигналов валентной деформации C-H связей метиленовых групп исходных олеатов (рис. 5а). При 2050 см^{-1} появляется сигнал сложной формы, состоящий из двух сигналов соотношение интенсивностей которых меняется при обработке раствора замещающего лиганда роданида аммония и при промывках изопропанолом (рис. 5б). Сигнал состоит из сигнала свободного тиоцианат аниона при 2067 см^{-1} и координированного по азоту с ионом свинца тиоцианата при 2044 см^{-1} . Схожее поведение описано для замещения роданидом аммония лигандной оболочки в точках теллурида цинка [20]. В регионе $3200\text{--}3100\text{ см}^{-1}$ наблюдается широкий сигнал связанный с валентными деформациями N-H связей в сорбированных ионах аммония.

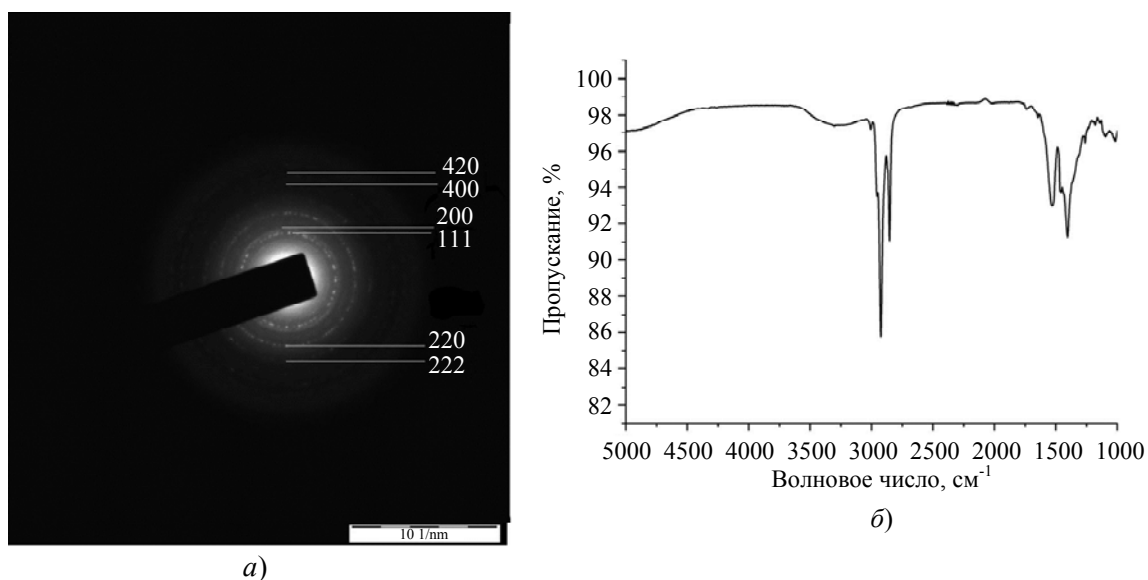


Рис. 3. а) SAED-изображение и б) ИК-спектр ККТ PbSe, полученных при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$

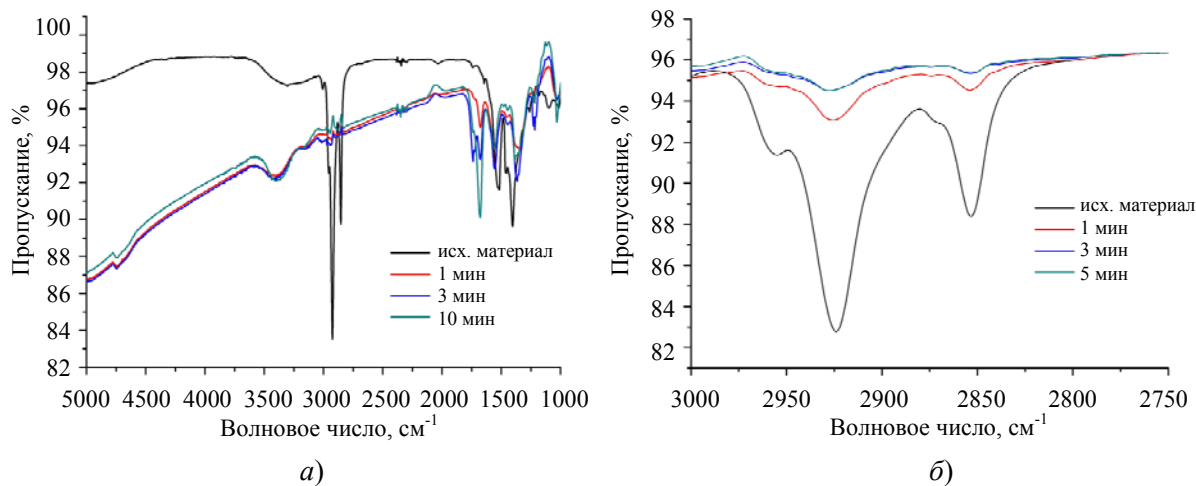


Рис. 4. Изменение спектра пропускания пленки ККТ HgSe в процессе замены лигандов на йодид ион: а) – спектр в диапазоне 5000–1000 см⁻¹ и б) – область валентных С-Н колебаний в диапазоне 3000–2750 см⁻¹

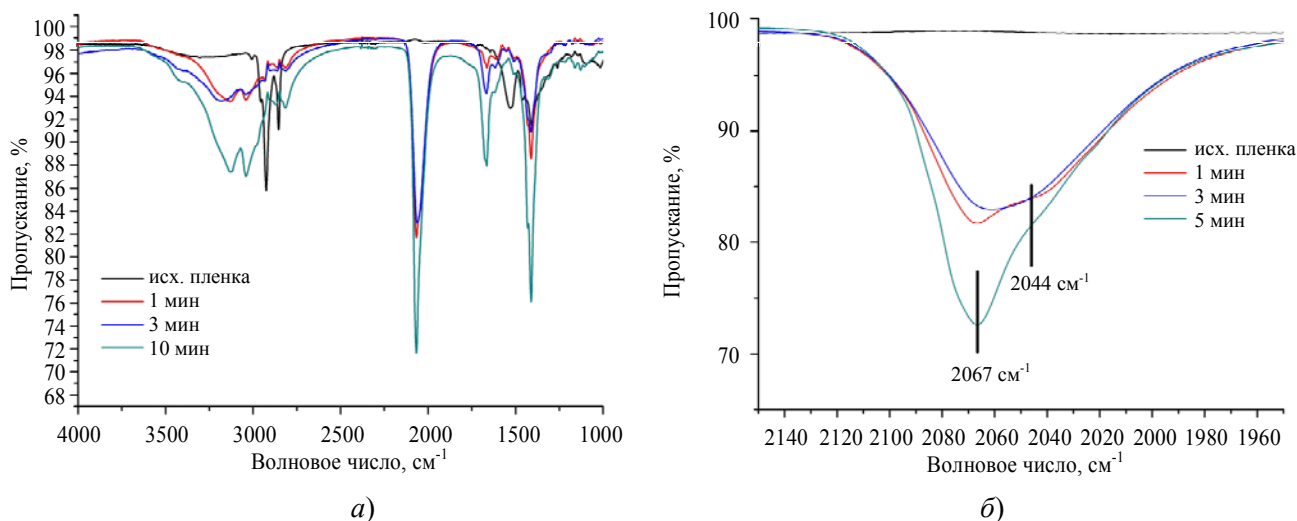


Рис. 5. Изменение спектра пропускания пленки ККТ HgSe в процессе замены лигандов на SCN

На основании данных полученных на модельных системах были выбраны оптимальные условия для создания фоточувствительной структуры резистивного типа. На золотые встречно-штыревые электроды с помощью спин-коатера были нанесена тонкая пленка ККТ селенида свинца и при засветке лазером 980 нм были определены вольт-амперные характеристики.

Величину фотоотклика и быстродействие фоторезистора оценивали по зависимости величины тока от времени при постоянном смещении (1В) и модулированной засветке (рис. 6). Средние значения величин фотоотклика и ампер-ваттной чувствительности составили 5,5 пА и 0,1 мкА/Вт, соответственно.

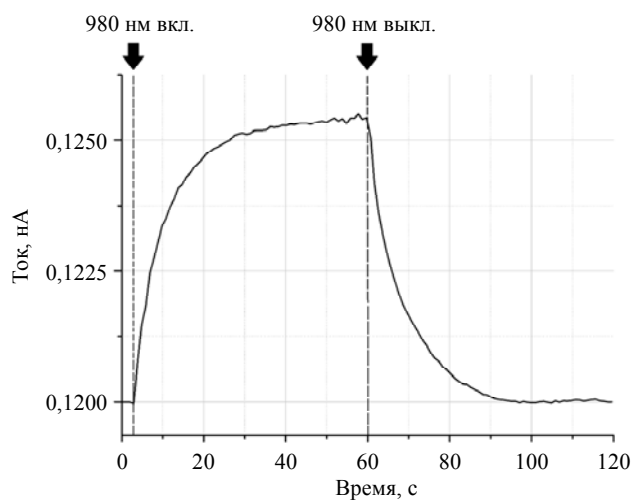


Рис. 6. Зависимость тока от времени при постоянном напряжении 1 В при засветке лазерным диодом с длиной волны 980 нм

Среднее значение времени спада фототока для всех исследованных фоторезисторов составило более 20 с. Полученное высокое значение времени спада позволяет предположить, что фотонным процессам в фотодетекторе при засветке сопутствуют тепловые процессы, которым свойственно длительное рассеивание тепловой энергии при выключении засветки.

Экспериментальная часть

Реактивы.

Следующие химикаты были использованы без дополнительной очистки: оксид свинца (99,998 %, Ланхит), селен (99,99 %, Ланхит), тетрабутиламмония йодид (99 %, Acros), децен-1 (90 %, Вектон), декан (эталонный, Компонентреактив), изопропанол (осч, Компонентреактив), цетан (эталонный, Компонентреактив). Олеиновая кислота (хч, Вектон) и олеиламин (80–90 %, Acros) были высушены нагревом (100 °С) при пониженном давлении (1 мбар). Прекурсор селена был получен по ранее опубликованной методике [13].

Методы измерений.

Для исследования размеров, морфологии и структуры наночастиц использовался просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) JEM-2100 производства компании JEOL (Япония) с ускоряющим напряжением 200 кВ. Анализ кристаллической структуры проводился путем сопоставления межплоскостных расстояний, измеренных по полученным SAED-изображениям, со значениями из базы данных для кристаллических структур. Оптические свойства оценивались методами спектрофотометрии с помощью спектрофотометра (JASCO V-770, JASCO) и методом спектрометрии на ИК-Фурье спектрометре (Spectrum 100, PerkinElmer) с приставкой многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО), оснащённой призмами из Ge и ZnSe (угол падения 45°, число отражений 25). С помощью атомно-силового микроскопа NT-MDT Solver-PRO в полуконтактном режиме была исследована морфология поверхности тонких пленок.

Исследования фоточувствительности проводились в ячейке со стальными подпружиненными контактами с использованием ис-

точника-измерителя тока и напряжения Keithley 2636В при комнатной температуре в воздушной атмосфере. Исследования проводились при постоянном напряжении $U = 1$ В, с модулированным излучением от лазерного диода с длиной волны 980 нм с продолжительностью засветки 60 с и скважностью 2.

Методика синтеза KKT PbSe.

Прекурсор свинца синтезировался, используя 0,446 г PbO (2 ммоль), 1,578 мл олеиновой кислоты и 5,1 мл децена. Полученную смесь перемешивали в течении 1 часа в токе аргона в двугорлой колбе при 120 °С, после чего доводили до оговоренной для каждого эксперимента температуры (110, 150 °С). Раствор селена в децене-1 (2 мл) с помощью шприца в течении 2 секунд добавили к приготовленному прекурзору ртути при выбранной температуре. После впрыска прекурсора селена температура реакционной смеси падает и поддерживается на необходимом уровне температуры синтеза. Реакционная смесь приобретает черную окраску в течении минуты. Время синтеза определялось индивидуально в диапазоне от 5 до 60 мин. После чего реакция останавливается резким охлаждением и погружением в ледяную баню. Частицы отмывались в системе гексан–изопропанол:ацетон (2:1). Для характеристики с помощью ПЭМ и ИК-Фурье спектрометрии полученные образцы растворяли в тетрахлорэтилене.

Методика изучения замены

На пластину приставки МНПВО (германий, 45°, площадь окна 5 см³), предназначенную для измерения жидкостей, наносится 0,3 мл коллоидного раствора квантовых точек селенида свинца в тетрахлорэтилене с концентрацией 10 мг/л. Растворитель из золя удаляется потоком воздуха при комнатной температуре с образованием тонкой пленки, после чего регистрируется спектр.

Далее на полученную пленку на приставке МНПВО наливается раствор замещающего лиганда (1 мл). Для предотвращения испарения приставка закрывается крышкой, и пленка подвергается действию замещающего раствора в течении желаемого времени. Избыток непрореагировавшего реагента смывается растворителем, после чего пленка высушивается на воздухе и производится измерение спектра.

Изготовление образцов фоторезисторов с заменой лигандов на йодид:

50 мкл золя коллоидных квантовых точек селенида свинца с концентрацией 5 мг/мл в тетрахлорэтилене были нанесены на встречно-штыревые электроды методом спин-коатинг (скорость 2500 оборотов/мин, время 45 с). Замена лигандов проводилась нанесением 50 мкл подготовленного раствора ТВАИ с концентрацией 20 мг/мл в формамиде на неподвижную подложку в течение 40 секунд, после чего последовал второй цикл центрифугирования с ускорением до 2500 оборотов/мин методом спин-коатинг (время 45 с). Избыток ТВАИ и продукты реакции удалялись нанесением 50 мкл формамида и 50 мкл ацетона на подложку методом спин-коатинг (скорость 2500 оборотов/мин, время 45 с). Для достижения требуемой толщины процедура нанесения и замены повторялась.

Выводы

Разработан инновационный метод синтеза коллоидных квантовых точек селенида свинца с применением раствора серого селена в децене-1. Проведено исследование влияния температуры реакции на размеры, распределение по размерам и спектральные характеристики квантовых точек PbSe. Осуществлена характеристика кристаллической структуры и лигандной оболочки полученных образцов. На основе этих материалов были созданы тонкие пленки, а также проанализирована их морфология. Исследована динамика замены исходной лигандной оболочки на анионы роданида и йодида в тонких пленках, и определено время, необходимое для достижения максимального замещения в изучаемых системах. На основе полученных коллоидных материалов была сформирована фоточувствительная структура на золотых встречно-штыревых электродах.

Авторы выражают благодарность А. А. Мардини за ряд ценных и важных замечаний.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 23-23-00300).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A., Ivanov V. V., Razumov V. F. / Russ. Chem. Rev. 2024. Vol. 93. № 4. P. RCR5113.
2. Shuklov I. A., Razumov V. F. / Russ. Chem. Rev. 2020. Vol. 89. № 3. P. 379.
3. Yu K., Schanze K. S. / ACS Central Science. 2023. Vol. 9. № 11. P. 1989–1992.
4. Böberl M., Kovalenko M., Gamerith S., List E. J. W., Heiss W. / Adv. Mater. 2007. Vol. 19. P. 3574–3578.
5. Ackerman M. M., Tang X., Guyot-Sionnest P. / ACS Nano 2018. Vol. 12. P. 7264–7271.
6. Keuleyan S. E., Guyot-Sionnest P., Delerue C., Allan G. / ACS Nano 2014. Vol. 8. P. 8676–8682.
7. Shen G., Guyot-Sionnest P. / Chem. Mater. 2019. Vol. 31. № 1. P. 286–293.
8. Bundulis A., Shuklov I. A., Kim V. V., Mardini A. A., Grube J., Alnis J., Lizunova A. A., Razumov V. F., Ganeev R. A. / Nanomaterials. 2021. Vol. 11. № 12. P. 3351.
9. Voskuil W., Arens J. F. / Org. Synth. 1968. Vol. 48. P. 47.
10. Evans C. M., Evans M. E., Krauss T. D. / J. Am. Chem. Soc. 2010. Vol. 132. № 32. P. 10973–10975.
11. Shuklov I. A., Mardini A. A., Skabitsky I. V., Dubrovina N. V., Perepukhov A. M., Lizunova A. A., Razumov V. F. / Nano-Structures & Nano-Objects. 2023. Vol. 35. P. 101020.
12. Shuklov I. A., Mikhel I. S., Nevidimov A. V., Birin K. P., Dubrovina N. V., Lizunova A. A., Razumov V. F. / ChemistrySelect. 2020. Vol. 5. № 38. P. 11896–11900.
13. Шуклов И. А., Миленкович Т., Майорова А. В., Вершинина О. В., Иванова В. А., Павлова В. Д., Попов В. С. / Прикладная физика. 2024. № 1. С. 43–50.
14. Moreels I., Lambert K., De Muynck D., Vanhaecke F., Poelman D., Martins J. C., Allan G., Hens Z. / Chemistry of Materials. 2007. Vol. 19. № 25. P. 6101–6106.
15. Murphy J. E., Beard M. C., Norman A. G., Ahrenkiel S. P., Johnson J. C., Yu P., Mičić O. I., Ellingson R. J., Nozik A. J. / J. Am. Chem. Soc. 2006. Vol. 128. № 10. P. 3241–3247.
16. Kumar U., Sharma S. N., Singh S., Kar M., Singh V. N., Mehta B. R., Kakkar R. / Materials Chemistry and Physics. 2009. Vol. 113. № 1. P. 107–114.
17. Pan Y., Soheli M. A., Pan L., Wei Z., Bai H., Tamargo M. C., John R. / Materials Today: Proceedings. 2015. Vol. 2. № 1. P. 281–286.
18. Бёккер Ю. Спектроскопия. – М.: Техносфера, 2009.
19. Kazarian S. G., Chan K. L. A. / Appl. Spectrosc. 2010. Vol. 64. № 5. P. 135A–152A.
20. Fafarman A. T., Koh W.-K., Diroll B. T., Kim D. K., Ko D.-K., Oh S. J., Ye X., Doan-Nguyen V., Crump M. R., Reifsnnyder D. C. / J. Am. Chem. Soc. 2011. Vol. 133. № 39. P. 15753–15761.

Preparation of PbSe colloidal quantum dots and thin films by application of the solution of selenium in decene-1

I. A. Shuklov*, T. Milenkovich, O. V. Vershinina, N. V. Dubrovina, O. A. Saptsova, V. S. Popov and V. V. Ivanov

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701 Russia

*E-mail: shuklov.ia@mipt.ru

Received 29.11.2024; revised 4.02.2025; accepted 10.02.2025

A new approach for the preparation of PbSe colloidal quantum dots applying a solution of gray selenium in decene-1 as a chalcogen precursor has been developed. The study of dependences of the size, size distribution, and spectral characteristics of PbSe colloidal quantum dots on the reaction temperature was performed. The crystal phase and ligand shell were investigated for the synthesized samples. Thin films were obtained from the obtained samples and their morphology was determined. The kinetics of the initial ligand shell exchange with thiocyanate and iodide anions in thin films was studied and the time of maximum ligand replacement for the studied systems was determined. The photosensor was manufactured by deposition of the prepared colloidal nanomaterial on the interdigitated electrodes.

Keywords: lead selenide; high-temperature colloidal synthesis; precursor; quantum dots.

REFERENCES

1. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A., Ivanov V. V. and Razumov V. F., Russ. Chem. Rev. **93** (4), RCR5113 (2024).
2. Shuklov I. A. and Razumov V. F., Russ. Chem. Rev. **89** (3), 379 (2020).
3. Yu K. and Schanze K. S., ACS Central Science **9** (11), 1989–1992 (2023).
4. Böberl M., Kovalenko M., Gamerith S., List E. J. W. and Heiss W., Adv. Mater. **19**, 3574–3578 (2007).
5. Ackerman M. M., Tang X. and Guyot-Sionnest P., ACS Nano **12**, 7264–7271 (2018).
6. Keuleyan S. E., Guyot-Sionnest P., Delerue C. and Allan G., ACS Nano **8**, 8676–8682 (2014).
7. Shen G. and Guyot-Sionnest P., Chem. Mater. **31** (1), 286–293 (2019).
8. Bundulis A., Shuklov I. A., Kim V. V., Mardini A. A., Grube J., Alnis J., Lizunova A. A., Razumov V. F. and Ganeev R. A., Nanomaterials **11** (12), 3351 (2021).
9. Voskuil W. and Arens J. F., Org. Synth. **48**, 47 (1968).
10. Evans C. M., Evans M. E. and Krauss T. D., J. Am. Chem. Soc. **132** (32), 10973–10975 (2010).
11. Shuklov I. A., Mardini A. A., Skabitsky I. V., Dubrovina N. V., Perepukhov A. M., Lizunova A. A. and Razumov V. F., Nano-Structures & Nano-Objects **35**, 101020 (2023).
12. Shuklov I. A., Mikhel I. S., Nevidimov A. V., Birin K. P., Dubrovina N. V., Lizunova A. A. and Razumov V. F., ChemistrySelect **5** (38), 11896–11900 (2020).
13. Shuklov I. A., Milenkovich T., Majorova A. V., Vershinina O. V., Ivanova V. A., Pavlova V. D. and Popov V. S., Applied Physics, № 1, 43–50 (2024) [in Russian].
14. Moreels I., Lambert K., De Muynck D., Vanhaecke F., Poelman D., Martins J. C., Allan G. and Hens Z., Chemistry of Materials **19** (25), 6101–6106 (2007).
15. Murphy J. E., Beard M. C., Norman A. G., Ahrenkiel S. P., Johnson J. C., Yu P., Mičić O. I., Ellingson R. J. and Nozik A. J., J. Am. Chem. Soc. **128** (10), 3241–3247 (2006).
16. Kumar U., Sharma S. N., Singh S., Kar M., Singh V. N., Mehta B. R. and Kakkar R., Materials Chemistry and Physics **113** (1), 107–114 (2009).
17. Pan Y., Soheli M. A., Pan L., Wei Z., Bai H., Tamargo M. C. and John R., Materials Today: Proceedings **2** (1), 281–286 (2015).

18. Bjokker Ju. Spektroskopija. Moscow, Tehnosfera, 2009.
19. Fafarman A. T., Koh W.-K., Diroll B. T., Kim D. K., Ko D.-K., Oh S. J., Ye X., Doan-Nguyen V., Crump M. R. and Reifsnnyder D. C., J. Am. Chem. Soc. **133** (39), 15753–15761 (2011).
20. Dou Q. and Ng K. M., Powder Technology **301**, 949–958 (2016).

Об авторах

Шуклов Иван Алексеевич, ведущий научный сотрудник, доцент, Dr. rer. nat. (к.х.н.), Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: shuklov.ia@mipt.ru SPIN-код РИНЦ 4060-7233, Author ID 1146575

Миленкович Теодора, младший научный сотрудник, аспирант, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: tmilenkovich@mail.ru

Вершинина Олеся Валерьевна, младший научный сотрудник, аспирант, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: seraia.ov@phystech.edu

Дубровина Наталья Владимировна, старший научный сотрудник, доцент, PhD (к.х.н.), Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). Author ID 598

Сапцова Ольга Алексеевна, младший научный сотрудник, магистр, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9).

Попов Виктор Сергеевич, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, доцент, к.х.н., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: popov.vs@mipt.ru SPIN-код РИНЦ 1128-2332, Author ID 625948

Иванов Виктор Владимирович, главный научный сотрудник, профессор, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН. Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: Ivanov.vv@mirt.ru SPIN-код РИНЦ 1856-3914, Author ID 19128