

УДК 621
EDN: ATVQNN

PACS: 85., 85.60.-q



Синтез и свойства коллоидных квантовых точек селенида ртути, полученных с использованием нового прекурсора селена на основе децена-1

И. А. Шуклов, Т. Миленкович, А. В. Майорова, О. В. Вершинина,
В. А. Иванова, В. Д. Павлова, В. С. Попов

Разработан новый прекурсор селена, полученный при растворении элементарного селена в децене-1 при повышенном давлении. Были найдены оптимальные условия для получения реагента с наибольшей реакционной способностью при синтезе наночастиц. Для полученного реагента проведено исследование состава с помощью ЯМР. Исследован синтез коллоидных квантовых точек HgSe с использованием разработанного прекурсора. Полученные ККТ HgSe обладают сильным поглощением в среднем ИК-диапазоне, связанным с внутризонным переходом. Продемонстрирована возможность создания фоточувствительных структур на основе полученного материала.

Ключевые слова: селенид ртути, высокотемпературный коллоидный синтез, прекурсор, квантовые точки.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-1-43-50

Коллоидные квантовые точки (ККТ) в течение последних десятилетий были объектом интенсивных исследований по созданию дешевых и легкодоступных солнечных батарей, фотодетекторов, лазеров и светодиодов. Возможность удобного направленного изменения спектрального диапазона чувствительности и простота нанесения коллоидных растворов этих наноматериалов на подложки делают их особенно интересными для применений в электронике в частности для создания фотодетекторов [1, 2]. Успехи по применению коллоидных квантовых точек в промышленности ознаменовались в этом году вручением Нобелевской премии по химии [3].

Коллоидные квантовые точки являются потенциальной заменой детекторов в ИК-диапазоне для более дорогих эпитаксиальных материалов таких как HgCdTe и InSb. В настоящее время для ИК-диапазона был разработан ряд коллоидных наноматериалов, покрывающих ближний ИК [4], средний ИК [5] и дальний ИК-диапазоны [6].

Селенид ртути HgSe, обладает нулевой шириной запрещенной зоны для объемного материала, являясь таким образом полуметаллом. Его радиус экситона Бора оценивают в 27,5 нм, т. е. он существенно больше чем у большинства $A^{II}B^{VI}$ полупроводников [7]. Также наночастицы селенида ртути часто об-

Шуклов Иван Алексеевич¹, в.н.с., доцент, Dr.rer.nat.
E-mail: shuklov.ia@mipt.ru

Миленкович Теодора¹, м.н.с., магистр.

Майорова Анна Викторовна¹, техник, бакалавр.

Вершинина Олеся Валерьевна¹, м.н.с., аспирант.

Иванова Валерия Антоновна¹, м.н.с., аспирант.

Павлова Валерия Денисовна^{1,2}, инженер, магистр.

Попов Виктор Сергеевич^{1,2}, зав. лаб., в.н.с., доцент, к.х.н.

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

² АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Статья поступила в редакцию 4.12.2023

После доработки 22.12.2023

Принята к публикации 29.12.2023

Шифр научной специальности: 1.4.4.

© Шуклов И. А., Миленкович Т., Майорова А. В., Вершинина О. В., Иванова В. А., Павлова В. Д., Попов В. С., 2024

ладают интенсивным поглощением в среднем ИК, связанным с внутризонным переходом. В связи с этим на них возлагаются большие надежды для создания детекторов для среднего ИК-диапазона. На основе селенида ртути изготовлены фоторезисторы для диапазона 3–5 мкм с чувствительностью $1,7 \times 10^9$ Jones [8].

Также селенид ртути показал интересные нелинейные оптические свойства [9, 10]. Для этого материала обнаружены сильное нелинейная рефракция и насыщаемое поглощение при засветке пико- и фемтосекундными лазерами, что открывает потенциал для использования этого материала в синхронизаторах мод лазеров.

Синтез наночастиц селенидов, таких как селениды ртути или свинца чаще всего осуществляется с использованием триоктилфосфин селенида [11, 12]. Данный реагент обладает хорошей реакционной способностью при этом как правило доступен в техническом качестве. Следствием этого является низкая воспроизводимость синтезов с данным реагентом из-за варьирующегося состава примесей в нем, в частности, диоктилфосфина. Это вещество является типичной плохо отделяемой примесью при стандартном синтезе триоктилфосфина через реактив Гриньяра и трихлорид фосфора [13]. Было показано, что это вещество образует более реакционноспособный диоктилфосфин селенид, чем производное триалкилфосфина. Таким образом, концентрация примесного диоктилфосфина существенно влияет на кинетику образования наночастиц селенидов с разными партиями триоктилфосфина [14]. Кроме того, в текущей ситуации, возникла необходимость в импортозамещении триоктилфосфина, который не производится в нашей стране.

В рамках работ по исследованию синтеза и свойств наночастиц халькогенидов ртути [15, 16], проводимых в нашей лаборатории, возникла необходимость в разработке более совершенных прекурсоров халькогенов для синтеза наночастиц. При этом предпочтение отдавалось реагентам на основе российских химических реактивов.

Одним из возможных кандидатов известных по литературе, является раствор селена в 1-октадецене. Этот реагент был успешно применен в синтезе селенидов свинца и

кадмия [17, 18]. Также этот реагент применялся для получения нанокристаллов селенида ртути [19]. Он малочувствителен к кислороду воздуха и атмосферной влаге и может быть приготовлен при совместном нагревании октадецена и селена при температуре выше 150°C . На данный момент 1-октадецен также не производится в РФ, но легко доступен его гомолог и близкий аналог, а именно 1-децен.

Авторы исследовали растворение элементарного серого селена в 1-децене. Было обнаружено что взаимодействие происходит крайне медленно при 150°C . В отличие от октадецена-1 данный алкен обладает более низкой температурой кипения в 170°C , препятствующей растворению селена при нормальных условиях. Поэтому было исследована данная реакция при температуре выше температуры кипения 180°C и 200°C в толстостенных стеклянных сосудах, выдерживающих предельное давление в 5 атм. Получение 0,1 М раствора селена в децене-1 при 180°C требует примерно 12 часов для полного растворения селена, при 200°C полное растворение достигается за 2 ч. В результате реакции получается светло-желтый прозрачный раствор. Дальнейшее растворение селена в 1-децене, для получения реагента с более высокой концентраций, затруднено и гомогенный раствор с концентрацией 0,4 М не образуется даже за 8 часов при 200°C . При этом был получен раствор более темного тёмно-жёлтого цвета характерного для полиселенидных мостиковых соединений (рис. 1).

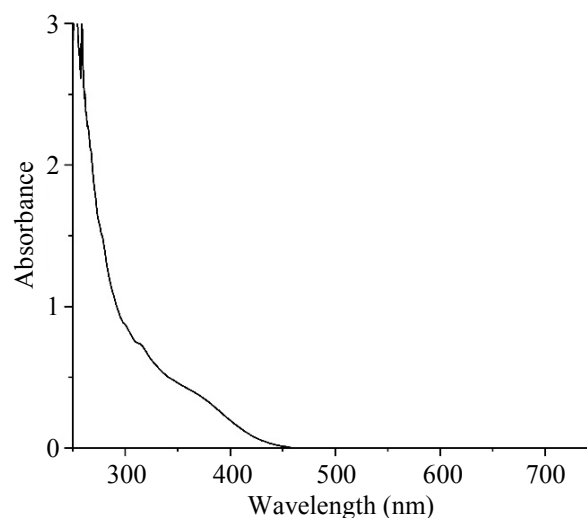


Рис. 1. Спектр поглощения насыщенного раствора селена в 1-децене

Исследование полученного раствора с помощью ^1H и ^{13}C ЯМР показало, что в процессе реакции образуются продукты взаимодействия с селеном. В частности ^1H ЯМР появляется и нарастает интенсивность мультиплета 5,26–5,31 ppm (рис. 2). Сигналы с аналогичным химическим сдвигом характер-

ны алкенов с внутренней двойной связью. Сходные сигналы в ^1H спектре описаны для продуктов взаимодействия октадецена-1 с элементарным селеном [18].

Подобные структуры возникают в результате аллильной перегруппировки со сдвигом в двойной связи из терминального положения.

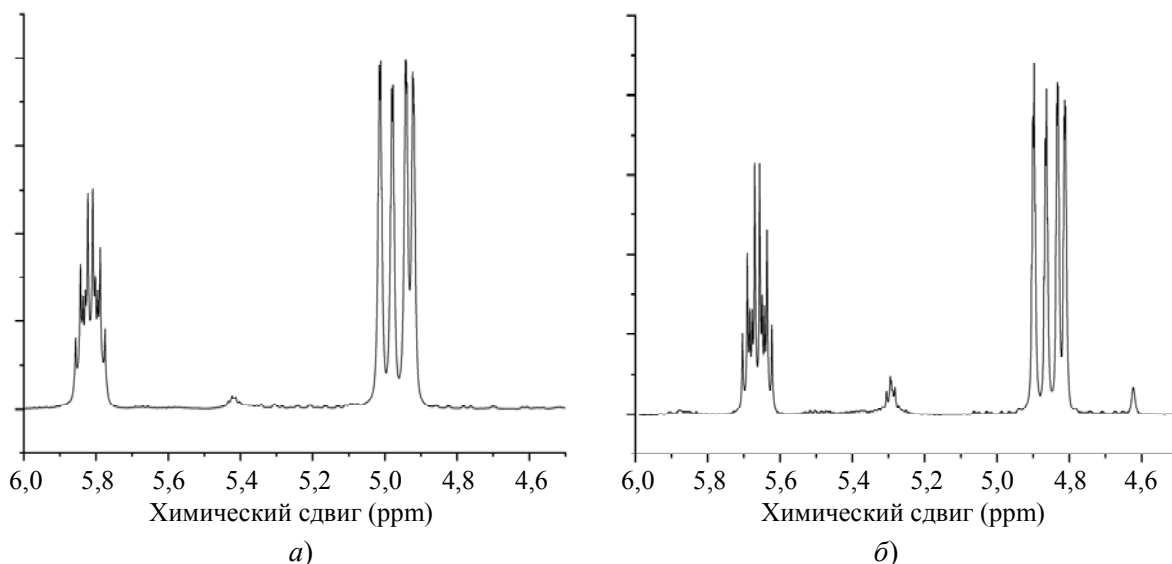
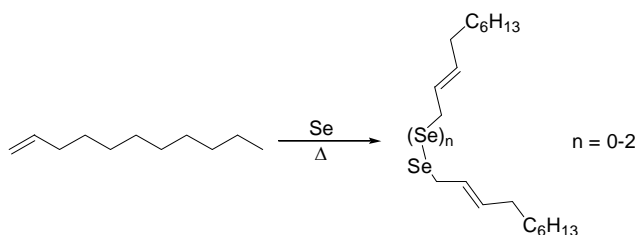


Рис. 2. Изменение спектра ^1H ЯМР в диапазоне 4,5–6 ppm при растворении селена в децене-1: а) – децен-1; б) – реакционная смесь с 1-деценом

Таким образом на основании данных спектров поглощения и ^1H ЯМР можно предположить образование димерных продуктов с селеновыми мостиками, возможная структура представлена ниже.



Синтез ККТ HgSe проводился с использованием прекурсора ртути полученном растворением хлорида свинца в олеиламине. Предварительная оптимизация показала, что образование наночастиц происходит легче с насыщенным раствором селена в 1-децене, полученным при кипячении 240 мг селена в

10 мл 1-децена. Прекурсор с концентрацией 0,1 М, полученный при растворении 77 мг элементарного селена в 10 мл децена, не реагировал при температуре ниже 120 °С. Для насыщенного раствора селена в 1-децене было проведено исследование зависимости спектральных свойств ККТ селенида ртути от температуры синтеза. Были проведены синтезы при температурах роста наночастиц от 80 °С до 120 °С и было установлено что максимум пика поглощения в ИК-диапазоне во всех случаях находился в узком диапазоне $1585 \pm 135 \text{ см}^{-1}$. При повышении температуры синтеза положение максимума смещается в сторону меньших длин волн от 1450 см^{-1} для 80 °С до 1720 см^{-1} при 120 °С (рис. 3б.) От температуры менялась также ширина и синяя граница пика поглощения, так что более узкий пик наблюдался при более высокой температуре.

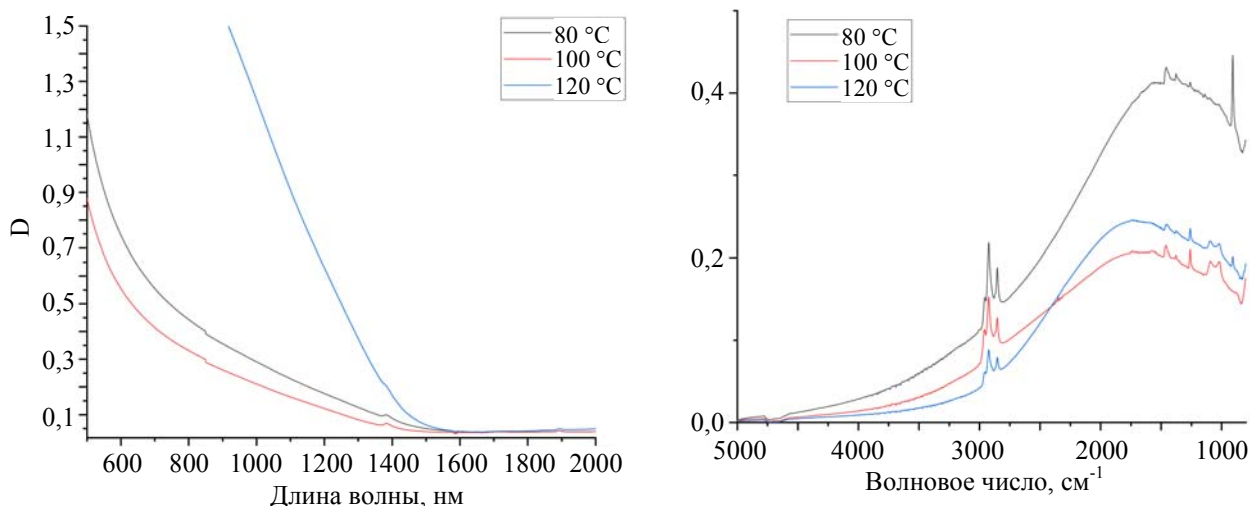


Рис. 3. Зависимость спектра поглощения от температуры синтеза ККТ HgSe

При этом край поглощения находится в диапазоне от 1350 нм до 1550 нм, повышаясь для образцов, полученных при более высокой температуре. SAED подтвердил что полученные нанокристаллы обладают кубической решеткой группы F43m с параметрами ячейки идентичными параметрам тиманиту (рис. 4). На SAED-картине наночастиц наблюдаются явно выраженные кольца рефлексов фаз селенида ртути (100), (220), (311).

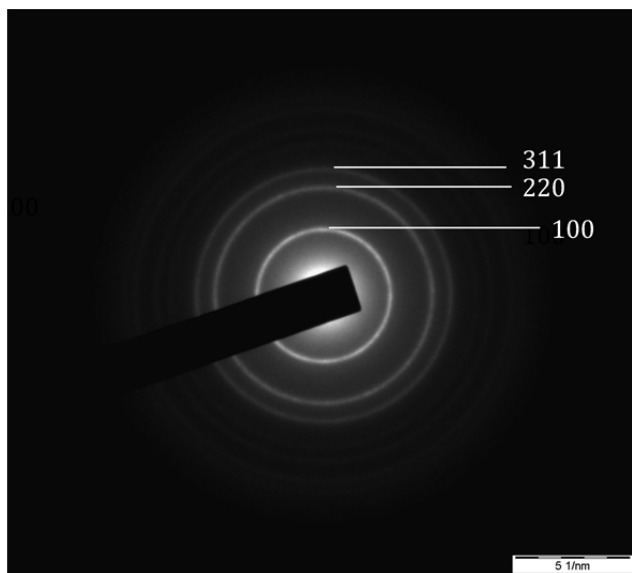
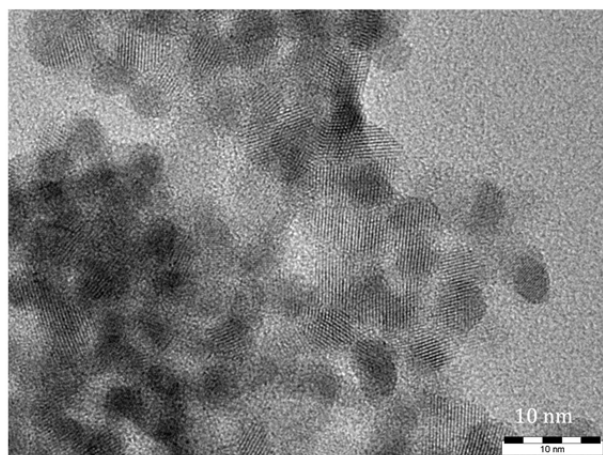


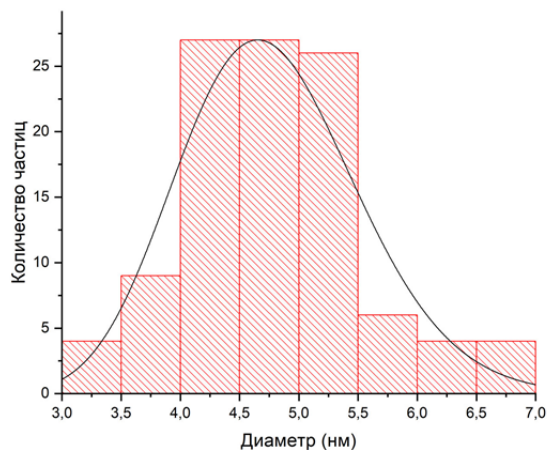
Рис. 4. SAED ККТ HgSe полученных при 120 °C

Анализ полученных образцов с помощью просвечивающей электронной микроскопии показал, что образующиеся частицы ККТ HgSe имеют сферическую форму. При 80 °C средний размер частиц составляет 4,7 нм (рис. 5а–б). При 120 °C средний размер частиц ККТ HgSe составляет 6,3 нм (рис. 5в–г). Анализ зависимости спектральных характеристик от размера частиц показал, что край поглощения сдвигается в красную область вместе с увеличением размера частиц. Это хорошо согласуется с квантово-размерным эффектом для частиц ККТ HgSe с размером меньше радиуса экситона Бора HgSe в 27 нм. При этом положение максимума внутризонного пика также незначительно сдвигается в длинноволновую область. Не удалось установить зависимости ширины пика в ИК-диапазоне от распределения частиц по размерам, в отличие от частиц ККТ HgSe описанных в работе [20].

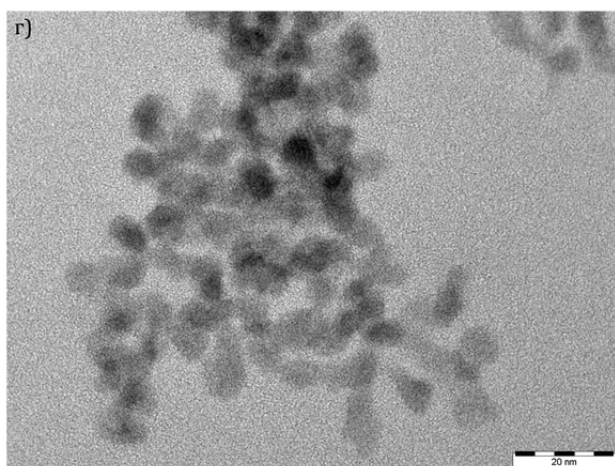
Для полученного коллоидного раствора в толуоле было проведено исследование размеров агрегатов с помощью метода динамического рассеяния света ДРС. Было установлено, что в исследованном диапазоне концентраций от 0,2 до 1 мкмоль/л частицы существуют в виде агрегатов со средним гидродинамическим диаметром порядка 240 нм (рис. 6).



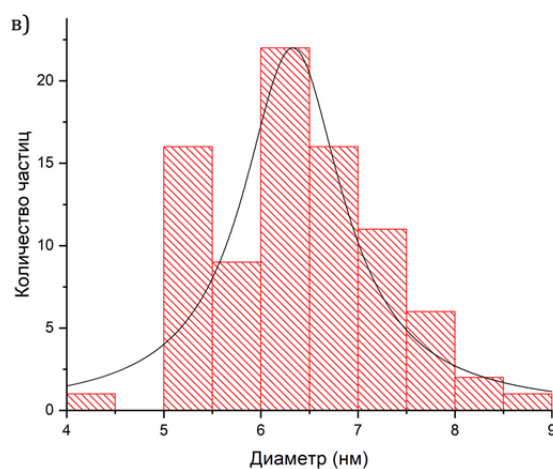
а)



б)



в)



з)

Рис. 5. а) – Микрофотография ПЭМ ККТ HgSe полученных при 80 °С; б) – гистограмма распределения частиц по размерам; в) – Микрофотография ПЭМ ККТ HgSe полученных при 120 °С; з) – гистограмма распределения частиц по размерам

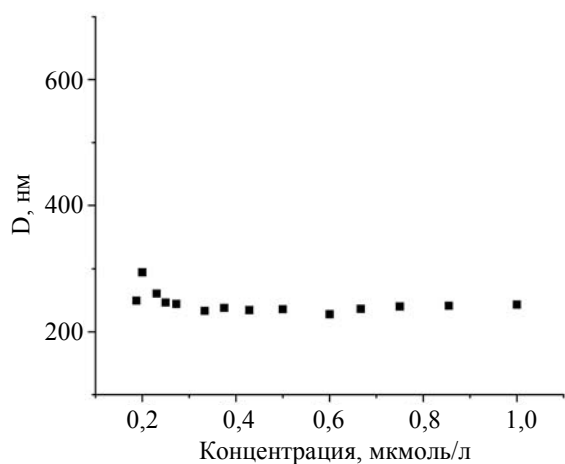


Рис. 6. Зависимость гидродинамического радиуса агрегатов ККТ HgSe в толуоле

На основе полученных образцов в тетрахлорэтилене методом послойного нанесения

с заменой были созданы образцы фоторезисторов на золотых встречно-штыревых электродах с шагом 20 мкм и высотой 100 нм на подложке из окисленного кремния. Образец, полученный с заменой исходной оболочки на роданид ион с помощью тиоцианата аммония, показал (рис. 7) типичную для фоторезисторов линейную зависимость вольт-амперной характеристики при засветке лазером 980 нм (30 мВт). Значение фототока при напряжении 1 В достигло 0,194 мкА, что при площади фоточувствительной области 0,3 мм² и плотности падающей мощности засветки 0,149 мВт/мм² даёт чувствительность 4,3 мА/Вт. Что более чем в 2,5 раза превосходит значения чувствительности (1,6 мА/Вт при 650 нм) полученной на фоторезисторах на основе слоёв ККТ PbS с наночастицами золота [21].

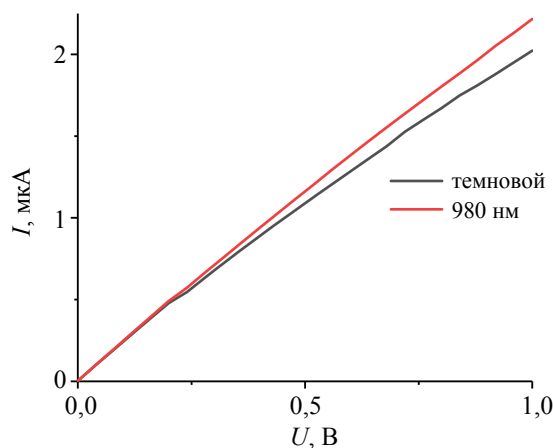


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика фоторезистора на основе ККТ HgSe при за- светке лазером 980 нм

Экспериментальная часть

Реактивы.

Следующие химикаты были использованы в синтезе ККТ HgSe без дополнительной очистки: хлорид ртути (99 %, Acros), селен (99,99999 %, Ланхит), олеиновая кислота (90 %, Aldrich), децен-1 (90 %, Вектон), гексан (99 % HPLC grade, MacronFineChemicals) и этанол (reagent grade, Khimmed), олеиламин (80–90 %, Acros), который был высушен нагревом (80 °С) при пониженном давлении (1 мбар).

Методы измерений.

Для исследований свойств наночастиц использовались следующие методы и средства измерений: ПЭМ (JEM-2100, JEOL), спектрофотометр (JASCOV-770, JACSO), ИК Фурье спектрометр (Spectrum 100, PerkinElmer) с приставкой многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО), оснащённой призмами из Ge и ZnSe (угол падения 45°, число отражений 25), источник-измеритель Keithley 4200A-SCS, лазер 980 нм с мощностью 30 мВт и радиусом пятна 15 мм.

Получение прекурсора селена.

Элементарный селен 3 ммоль (240 мг) поместили в толстостенный стеклянный реактор вместе с 10 мл 1-децена. Реакционную смесь нагревали при 200 °С в масляной бане при перемешивании в течении 4 часов. Полученный оранжевый надосадочный раствор использовался в качестве прекурсора селена в синтезе нанокристаллов.

Методика синтез ККТ HgSe.

Прекурсор ртути синтезировался, используя 0,7 ммоль (0,188 г) HgCl₂ и 5 мл олеиламина. Полученную смесь нагревали при перемешивании в течении 1 часа в токе аргона при 100 °С в двугорлой колбе, чтобы сформировать прекурсор ртути. Прекурсор селена (2 мл) быстро добавили к приготовленному прекурсорам 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. Через 10 мин колба погружается в воду со льдом, и реакция останавливается добавлением холодного гексана. Наночастицы HgSe выделяются при помощи трехкратного пересаживания. Реакция останавливалась резким охлаждением в ледяной бане, затем добавлялось 2 мл н-гексана и 1 мл олеиновой кислоты с последующим перемешиванием в течение 15 мин. Выделение и очистка ККТ осуществлялась посредством добавления этанола с последующим центрифугированием и редиспергированием в н-гексане.

Изготовление образцов фоторезисторов с заменой лигандов на роданид:

50 мкл золя коллоидных квантовых точек селенида ртути с концентрацией 10 мг/мл в гексане были нанесены на встречно-штыревые электроды методом спин-коатинг (скорость 4000 оборотов/мин, время 45 с). Замена лигандов проводилась нанесением 100 мкл подготовленного раствора тиоцианата аммония с концентрацией 20 мг/мл в изопропанол на неподвижную подложку с последующим ускорением до 4000 оборотов/мин (время 45 с). Избыток роданида и продукты реакции удалялись нанесением 100 мкл изопропанола на подложку с последующей ее раскруткой (скорость 4000 оборотов/мин, время 45 с). Для достижения требуемой толщины процедура нанесения и замены повторялась.

Методика измерения ВАХ.

Измерения проводятся с помощью параметрического анализатора Keithley 4200A-SCS, к которому подключена зондовая станция. Исследуемый образец помещался на специальный столик для обеспечения контакта с

зондами. Измерения проводились в отсутствие и при наличии засветки. Засветка обеспечивается лазером с длиной волны 980 нм.

Заключение

В работе были впервые получены новые прекурсоры селена на основе элементарного серого селена и децена-1. Для полученных реагентов проведено исследование их состава с помощью спектроскопии ЯМР и спектрофотометрии, и на основе полученных данных предложен их химический состав. С использованием наиболее активного прекурсора селена была разработана методика получения ККТ HgSe. Варьируя температуру синтеза от 80 °С до 120 °С были получены наночастицы со средним размером от 4,7 до 6,3 нм. Продемонстрирована возможность создания фоточувствительных структур фоторезистивного типа на основе тонких пленок ККТ HgSe, созданных послойной нанесением и заменой на SCN. Полученные данные должны способствовать направленному созданию фоточувствительных структур на основе коллоидных квантовых точек селенида ртути свинца с помощью послойного нанесения с заменой лигандов.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Пономаренко В. П., Попов В. С., Попов С. В. / Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 1. С. 25.
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. Oluwafemi O. S., Sakho E. H. M., Parani S., Lebepe T. C. Ternary Quantum Dots: Synthesis, Properties, and Applications. – Elsevier Science, 2021.
8. Chen M., Hao Q., Luo Y., Tang X. / ACS Nano. 2022. Vol. 16. № 7. P. 11027–11035.
9. Ganeev R. A., Shuklov I. A., Zvyagin A. I., Dyomkin D. V., Smirnov M. S., Ovchinnikov O. V., Lizunova A. A., Perepukhov A. M., Popov V. S., Razumov V. F. / Optics Express. 2021. Vol. 29. № 11. P. 16710–16726.
10. Ganeev R. A., Kim V. V., Shuklov I. A., Popov V. S., Lavrentyev N. A., Ponomarenko V. P., Mardini A. A., Dyomkin D. V., Milenkovič T., Bundulis A., Grube J., Sarakovskis A. / Applied Physics B. 2022. Vol. 128. № 11. P. 202.
11. Shen G., Guyot-Sionnest P. / Chemistry of Materials. 2019. Vol. 31. № 1. P. 286–293.
12. 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.
13. Voskuil W., Arens J. F. / Org. Synth. 1968. Vol. 48. P. 47.
14. Evans C. M., Evans M. E., Krauss T. D. / Journal of the American Chemical Society. 2010. Vol. 132. № 32. P. 10973–10975.
15. 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.
16. 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.
17. Bullen C., van Embden J., Jasieniak J., Cosgriff J. E., Mulder R. J., Rizzardo E., Gu M., Raston C. L. / Chemistry of Materials. 2010. Vol. 22. № 14. P. 4135–4143.
18. Chen O., Chen X., Yang Y., Lynch J., Wu H., Zhuang J., Cao Y. C. / Angewandte Chemie International Edition. 2008. Vol. 47. № 45. P. 8638–8641.
19. Mirzai H., Nordin M. N., Curry R. J., Bouillard J. S., Zayats A. V., Green M. / Journal of Materials Chemistry C. 2014. Vol. 2. № 12. P. 2107–2111.
20. Chen M., Shen G., Guyot-Sionnest P. / The Journal of Physical Chemistry C. 2020. Vol. 124. № 29. P. 16216–16221.
21. He J., Luo M., Hu L., Zhou Y., Jiang S., Song H., Ye R., Chen J., Gao L., Tang J. / Journal of Alloys and Compounds. 2014. Vol. 596. P. 73–78.

PACS: 85., 85.60.-q

Synthesis and properties of mercury selenide colloidal quantum dots, prepared with the new selenium precursor based on Decene-1

I. A. Shuklov¹, T. Milenkovich¹, A. V. Majorova¹, O. V. Vershinina¹, V. A. Ivanova¹, V. D. Pavlova^{1,2} and V. S. Popov^{1,2}

¹Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

²Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

Received 4.12.2023; revised 22.12.2023; accepted 29.12.2023

New selenium precursor was prepared by dissolution of elemental selenium in decene-1 at elevated pressure. The best conditions were determined for the preparation of reagent with the highest reactivity in the synthesis of nanoparticles. The developed precursor was studied by NMR spectroscopy. Synthesis of mercury selenide quantum dots was developed and studied with this reagent. The prepared HgSe quantum dots possess strong absorption in mid-IR spectral range. The developed material was successfully tested in the preparation of photoresistor.

Keywords: mercury selenide, hot injection synthesis, selenium precursor, colloidal quantum dots, nanocrystals.

REFERENCES

1. Ponomarenko V. P., Popov V. S. and Popov S. V., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics 9 (1), 25 (2021) [in Russian].
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. Oluwafemi O. S., Sakho E. H. M., Parani S. and Lebepe T. C., Ternary Quantum Dots: Synthesis, Properties, and Applications, Elsevier Science, 2021.
8. Chen M., Hao Q., Luo Y. and Tang X., ACS Nano **16** (7), 11027–11035 (2022).
9. Ganeev R. A., Shuklov I. A., Zvyagin A. I., Dyomkin D. V., Smirnov M. S., Ovchinnikov O. V., Lizunova A. A., Perepukhov A. M., Popov V. S. and Razumov V. F., Optics Express **29** (11), 16710–16726 (2021).
10. Ganeev R. A., Kim V. V., Shuklov I. A., Popov V. S., Lavrentyev N. A., Ponomarenko V. P., Mardini A. A., Dyomkin D. V., Milenkovič T., Bundulis A., Grube J. and Sarakovskis A., Applied Physics B **128** (11), 202 (2022).
11. Shen G. and Guyot-Sionnest P., Chemistry of Materials **31** (1), 286–293 (2019).
12. 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).
13. Voskuil W. and Arens J. F., Org. Synth. **48**, 47 (1968).
14. Evans C. M., Evans M. E. and Krauss T. D., Journal of the American Chemical Society **132** (32), 10973–10975 (2010).
15. 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).
16. 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).
17. Bullen C., van Embden J., Jasieniak J., Cosgriff J. E., Mulder R. J., Rizzardo E., Gu M. and Raston C. L., Chemistry of Materials **22** (14), 4135–4143 (2010).
18. Chen O., Chen X., Yang Y., Lynch J., Wu H., Zhuang J. and Cao Y. C., Angewandte Chemie International Edition **47** (45), 8638–8641 (2008).
19. Mirzai H., Nordin M. N., Curry R. J., Bouillard J. S., Zayats A. V. and Green M., Journal of Materials Chemistry C **2** (12), 2107–2111 (2014).
20. Chen M., Shen G. and Guyot-Sionnest P., The Journal of Physical Chemistry C **124** (29), 16216–16221 (2020).
21. He J., Luo M., Hu L., Zhou Y., Jiang S., Song H., Ye R., Chen J., Gao L. and Tang J., Journal of Alloys and Compounds **596**, 73–78 (2014).