

УДК 621  
EDN: QSJMTN

PACS: 85., 85.60.-q



## Исследование процесса замены лигандов в тонких слоях коллоидных квантовых точек сульфида свинца с помощью ИК-Фурье спектроскопии

И. А. Шуклов, Д. В. Демкин, В. А. Конавичева, В. С. Попов, В. Ф. Разумов

*Для оптимизации фоточувствительных структур на основе коллоидных квантовых точек сульфида свинца было проведено исследование скорости и полноты замены в тонких слоях с помощью ИК-Фурье спектроскопии на приставке многократного нарушенного полного внутреннего отражения. Была впервые исследована скорость процесса замены лигандов в тонком слое коллоидных квантовых точек сульфида свинца при замене на йодид-ион в разных растворителях. Показано изменение состава оболочек наночастиц PbS под действием ряда растворителей и при проведении замены на роданид-ионы. Впервые установлено замещение олеатной лигандной оболочки чистым формамидом.*

*Ключевые слова:* сульфид свинца, замена лигандов, ИК-Фурье спектроскопия, квантовые точки.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-35-42

### Введение

Коллоидные квантовые точки (ККТ) в течении 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 доступность нанесения зольей этих наноматериалов на подложки делают их особенно интересными для применений в электронике в частности для создания фотодетек-

торов [1]. Сочетание большого радиуса экситона Бора в объемном материале (18 нм) и ширины запрещенной зоны 0,41 эВ ККТ PbS позволяет изменять положение максимума пика экситонного поглощения в диапазоне от 800 до 2100 нм при изменении среднего размера наночастиц от 2 до 10 нм, тем самым задавая диапазон спектральной чувствительности в фотодетекторах на основе ККТ [2].

В последние несколько лет именно с применением ККТ PbS созданы первые промышленные образцы матричных фотоприем-

**Шуклов Иван Алексеевич**<sup>1</sup>, с.н.с., доцент, Dr.rer.nat.  
E-mail: shuklov.ia@mipt.ru

**Демкин Дмитрий Викторович**<sup>1</sup>, техник, бакалавр.

**Конавичева Виктория Алексеевна**<sup>1</sup>, техник, бакалавр.

**Попов Виктор Сергеевич**<sup>1,2</sup>, зав. лаб., нач. центра, в.н.с., доцент, к.х.н.

**Разумов Владимир Федорович**<sup>1,3,4</sup>, зав. лаб., чл.-кор. РАН, д.ф.-м.н., профессор.

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

Россия, 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

<sup>2</sup> АО «НПО «Орион».

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

<sup>3</sup> ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, просп. акад. Семенова, 1.

<sup>4</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова Факультет фундаментальной физико-химической инженерии.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 51.

Статья поступила в редакцию 06 декабря 2022 г.

© Шуклов И. А., Демкин Д. В., Конавичева В. А., Попов В. С., Разумов В. Ф., 2022

ных устройств мегапиксельного формата, что за счёт простоты технологии открывает возможность существенного снижения цены матричных фотоприемников и расширения их возможных применений [3].

Для создания фотодетекторов химическими жидкостными методами формируются тонкие слои из ККТ. Лигандные оболочки коллоидных квантовых точек в тонких слоях имеют большое влияние на многие важные параметры. Они определяют долговременную стабильность пленок к воздействию кислорода и влаги. От свойств поверхности нанокристаллов, определяемой ее лигандной оболочкой, зависит образование ловушек. Для увеличения вероятности переноса заряда в слоях необходимо сокращение расстояния между наночастицами, поэтому в качестве лигандов для замены используются короткие молекулы, обеспечивающие уменьшение расстояния между отдельными частицами. При этом в процессе замены необходимо сохранить индивидуальность наночастиц и избежать их слипание в массив. Таким образом, от лигандной оболочки зависит эффективность работы солнечных батарей, фотосенсоров изготовленных на основе слоёв ККТ [4].

Исследование процессов замены лигандов в коллоидных квантовых точках возможно рядом физико-химических методов [5], таких как  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  ЯМР, [6] ИК-Фурье спектроскопия [7] и Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) [8]. При этом для исследования пленок пригодны только ИК-Фурье спектроскопия и РФЭС. Оба метода позволяют также проводить количественную оценку состава лигандной оболочки. Большинство исследований по замене лигандов в пленках не рассматривает скорость превращения в пленках, а используется для сравнения эффективности различных лигандов в замещении исходной оболочки [9–11].

При этом для создания устройств требуются равномерные слои с высокой оптической плотностью, т. е. большим поглощением в заданном диапазоне. Подобные слои толщиной в несколько сотен нанометров и шероховатостью в несколько нанометров создаются как правило послойным нанесением (layer-by-layer deposition) с помощью дип-коатинга или спин-коатинга [12]. Для этого требуется нанесение

нескольких десятков слоев с последующей заменой лигандной оболочкой в пленке. Оптимизация процесса создания подобных устройств требует изучения полноты и скорости проводимой замены в зависимости от толщины слоя.

Изучение скорости замены лигандов в пленках нанокристаллов привлекало к себе намного меньше внимания в научной литературе, чем исследование полноты замены. Так скорость замены в пленках перовскитов исследовалась с помощью РФЭС [13]. В работе [14] замещение в пленках ККТ PbS с помощью тетрабутиламмония йодида в метаноле на подложках оксида индия-олова изучалось с помощью РФЭС и ИК-Фурье спектроскопии. В данной работе было показано качественное изменение ИК-спектра пленки в зависимости от времени замещения. Для количественного анализа процесса замещения использовался РФЭС.

Использование приставки многократного нарушенного внутреннего отражения (МНПВО) [15] для отслеживания процесса замены имеет неоспоримое преимущество – очень высокую чувствительность при наблюдении процесса замены в образце пленки, максимально приближенном по своим параметрам к используемым при создании фотодетекторов. Метод МНПВО активно применяется для исследования процессов адсорбции/десорбции на пленках наночастиц [16]. Ранее с помощью приставки МНПВО было исследовано изменения состава пленок CdS с олеатной оболочкой под воздействием воды в проточном реакторе [17].

В рамках данной работы было проведено исследование скорости и полноты замены лигандов в пленках ККТ PbS при использовании тетрабутиламмоний йодида и тиоизоцианата аммония в ряде растворителей, а также влияние растворителей на состав пленок. Для замены на йодид ион была исследована также скорость замены исходной олеатной оболочки. Проведенное исследование необходимо для рационального создания фоточувствительных структур на основе коллоидных квантовых точек сульфида свинца химическими жидкостными методами с послойной заменой лигандов.

## Экспериментальная часть

### Реактивы

Следующие химикаты были использованы в синтезе ККТ PbS без дополнительной очистки: оксид свинца (99,99 %, Acros), сера (99,99999 %, Реахим), олеиновая кислота (90 %, Aldrich), октадецен-1 (90 %, Aldrich), 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).

### Методика синтез ККТ PbS [23]

Прекурсор свинца синтезировался, используя 2 ммоль (0,464 г) PbO, 12 ммоль (3,395 г/3,890 мл), олеиновой кислоты и 4 мл (3,166 г) октадецена. Полученную смесь дегазировали под вакуумом при комнатной температуре, а затем нагревали при перемешивании в течении 1 часа в токе аргона до при 110 °С в двугорлой колбе, чтобы сформировать олеат свинца. Прекурсор S синтезируется добавлением 0,66 ммоль (0,0212 г) порошка S в 5 мл (4,064 г) олеиламина и нагревом под аргоном до 95 °С в сосуде Шленка в течении 1 часа. Полученный раствор быстро добавили к прекурзору свинца. После впрыска прекурсора серы температура реакционной смеси падает и поддерживается на необходимом уровне температуры синтеза. Через 15 мин колба погружается в воду со льдом, и реакция останавливается добавлением холодного гексана. Наночастицы PbS выделяются при помощи трехкратного переосаждения. К реакционной смеси добавляется EtOH, после чего производится центрифугирование, надосадочная жидкость сливается, осевшие на дне ККТ редис-

пергируются в гексане для следующей итерации. Для измерения спектра поглощения и нанесения редиспергируются в тетрахлорэтилене.

### Методика изучения замены

Для изучения замены вначале на германиевую пластину приставки МНПВО, предназначенную для измерения жидкостей, с площадью окна 5 см<sup>3</sup> наносится 0,15 мл коллоидного раствора квантовых точек размера 7,3 нм с концентрацией 30 мг/л. Полученный раствор высушивается на воздухе при комнатной температуре. После чего с полученной пленки снимается спектр.

Для исследования замены в пленке на полученную пленку наливается раствор с лигандов для замены объемом 1 мл и закрывается крышкой для предотвращения испарения, после чего пленка подвергается действию заменяющего раствора в течении желаемого времени. Избыток заменяющего реагента смывается растворителем, пленка высушивается и производится измерение спектра.

## Результаты и обсуждение

В рамках работ, проводимых в нашей лаборатории по изучению свойств ККТ сульфида свинца и созданию фоточувствительных элементов на их основе, возникла необходимость детального изучения процесса замены в тонких слоях [18, 19].

При проведении замены олеатных лигандов на неорганические такие как I<sup>-</sup>, SCN<sup>-</sup> или при взаимодействии с чистыми растворителями, такими как ацетонитрил, метанол, изопропанол, формамид может происходить полная или частичная замена лигандной оболочки. ИК-спектроскопия позволяет хорошо различать лиганды исходной оболочки от сигналов новых лигандов. Олеатные лиганды (CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>7</sub>CH=CH(CH<sub>2</sub>)<sub>7</sub>COO) обладают характеристичными только для них сигналами валентных колебаний метиленовых групп при 2925 и 2853 см<sup>-1</sup>. Данные сигналы позволяют хорошо определить по изменениям ИК-спектра замещение олеатов, как на широкий ряд неорганических лигандов (SCN<sup>-</sup>, I<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, S<sup>2-</sup>), так и на многие органические вещества – растворители или лиганды, не обладающие

метиленовыми группами ( $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ , изопропанол, формамид,  $(\text{CH}_3)_2\text{SO}$  и т. д.). Эти сигналы также находятся в зоне спектра с максимальной чувствительности прибора с германиевой приставкой МНПВО и DTGS детектором. Этот факт позволяет следить за изменениями количественно, отслеживая изменение интегральной площади пика. Так как интересующие нас сигналы составляют мультиплет с другими С-Н колебаниями, то для выделения сигнала нами использовалась деконпозиция мультиплетов, то есть разложение пика на составляющие его синглеты с помощью гауссовой аппроксимации.

Интерес также представляют маятниковые колебания цепочек  $\text{CH}_2$  групп, характерные для жирных кислот при  $800\text{ см}^{-1}$ . Изменение в этой области спектра позволяет качественно наблюдать за изменениями оболочки. К сожалению, в этом районе доступная конфигурация прибора не допускает хорошей чувствительности и таким образом количественных измерений. Спектр в диапазоне от  $1000$  до  $2000\text{ см}^{-1}$  не обладает характерными интенсивными сигналами уникальными для олеатов.

В рамках работы было исследовано замещение исходной оболочки из олеиновой кислоты для коллоидных квантовых точек сульфида свинца размером  $7,3\text{ нм}$  (рис. 1а-б). Данные нанокристаллы были получены по ранее разработанной в нашей лаборатории методике [20]. Исследованные частицы имеют сферическую форму с гранями (100) и (111), обладающими разной реакционной способностью. Исследованный образец обладает четко выраженным экситонным пиком поглощения с максимумом на  $1750\text{ нм}$ .

В рамках работы было исследовано влияние растворителя на скорость и полноту замены лигандов на йодид ионы при использовании тетрабутиламмоний йодида в качестве реагента. Для проведенных замен наблюдаются следующие кривые падения интенсивности метиленовых сигналов (рис. 2). Результаты исследования позволяют говорить о том, что в метаноле и изопропаноле возможно более полное удаление лигандной оболочки. Так уже через  $60$  секунд в метаноле наблюдается падение интегральной площади сигнала на  $80\%$ , в то время как в ацетонитриле только на  $15\%$ . Также и скорость замены в алифатиче-

ских спиртах больше чем в ацетонитриле. Таким образом, можно говорить, что алифатические спирты намного ускоряют удаление исходных лигандов и их последующее замещение.

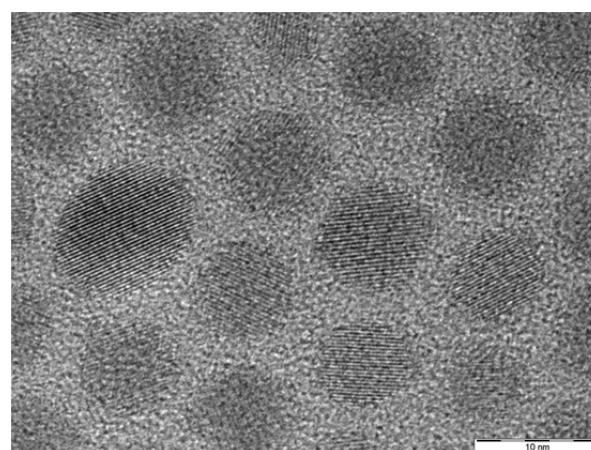
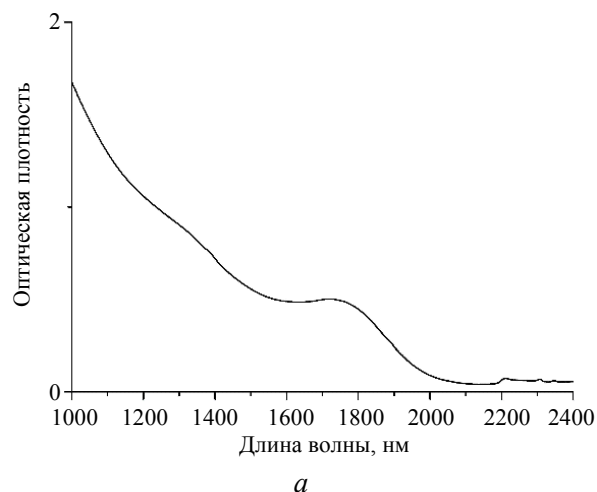


Рис. 1. а – спектр поглощения золя ККТ PbS; б – просвечивающая электронная микротография

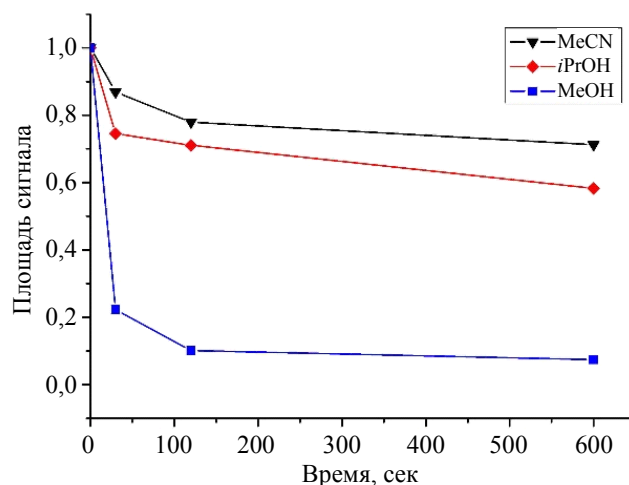


Рис. 2. Измерение нормированной площади сигналов С-Н колебаний

При проведении замены в метаноле происходит слипание квантовых точек с потерей их индивидуальности, приводящее к увеличению поглощения в диапазоне ближнего ИК, выражающееся к наблюдаемому подъему в сторону  $4000\text{ см}^{-1}$  (рис. 3а).

Замена с использованием роданида аммония не позволяет оценить количественно замену по спектру в связи с появлением уширенного сигнала в области  $2800\text{ см}^{-1}$  (рис. 4). Природа этого сигнала не до конца ясна. Многократное промывание пленки раствором

ацетонитрила не изменяет спектр поглощения пленки, а это вещество хорошо растворимо в ацетонитриле в свободном виде. Это позволяет говорить о том, что этот сигнал не относится к свободному роданиду аммония. Таким образом сигнал может относиться к аммонийным ионам, координированным на поверхности квантовых точек, либо данный сигнал связан с внутризонными переходом. Определение точной природы данного сигнала является предметом дальнейшего исследования.

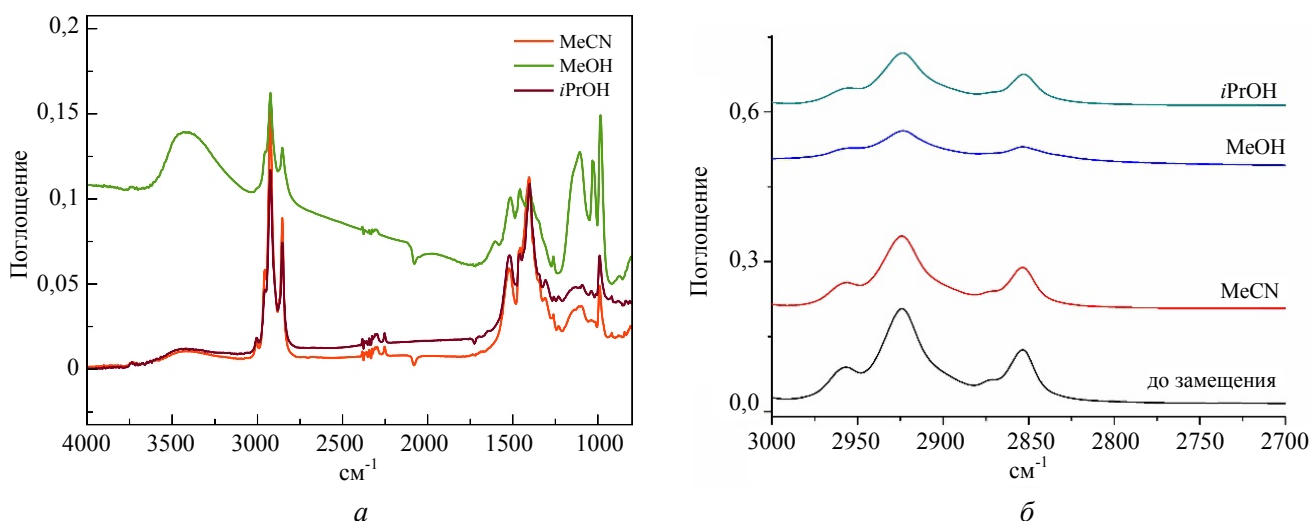


Рис. 3. Спектры поглощения тонких пленок ККТ PbS на приставке МНПВО до замены и после обработки растворами тетрабутиламмония йодида в изопропанол, метаноле и ацетонитриле в течении 10 минут: а – спектр от  $800$  до  $4000\text{ см}^{-1}$ ; б – область  $\text{CH}$ -колебаний  $2700\text{--}3000\text{ см}^{-1}$

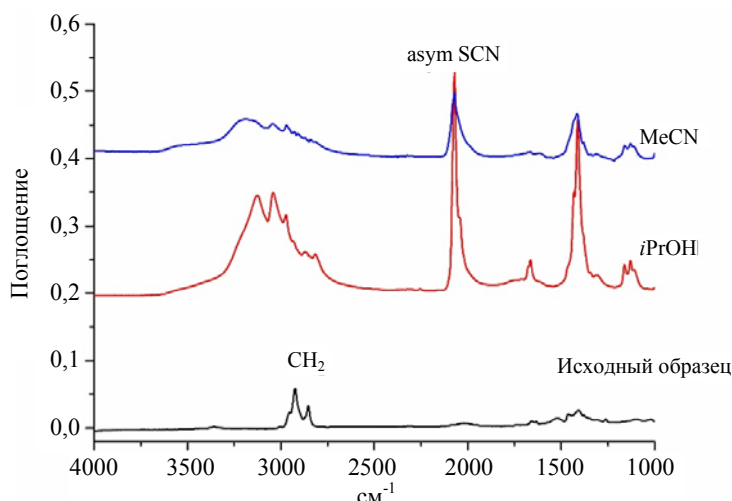


Рис. 4. ИК-Фурье спектры тонких пленок ККТ PbS на МНПВО до замены и после обработки растворами  $\text{NH}_4\text{SCN}$  в изопропанол и ацетонитриле

Роданид ионы быстро замещают исходную олеатную оболочку и в ацетонитриле и в изопропанол. Об этом можно судить по быстро растущему сигналу валентного колебания при  $2070\text{ см}^{-1}$  CN в роданид ионе (рис. 4). Положение сигнала говорит о креп-

кой связи роданид иона с металлом ядра коллоидной квантовой точки и близко к известным значениям для сульфида свинца с подобной заменой [21]. Оно также близко к значениям колебаний в роданиде свинца ( $\text{Pb}(\text{SCN})_2$ ).

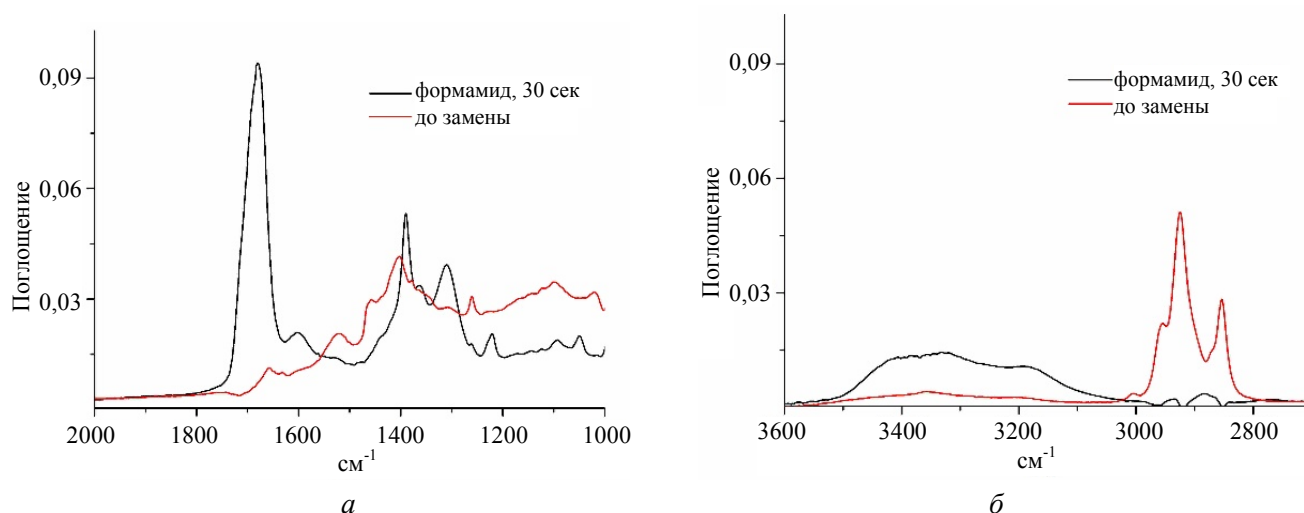


Рис. 5. ИК-Фурье спектры тонких пленок ККТ PbS на МНПВО до замены и после обработки формамидом: а – спектр от 1000 до 2000  $\text{см}^{-1}$ ; б – область СН-колебаний 2700–3600  $\text{см}^{-1}$

При проведении экспериментов по замене лигандов было также исследовано действие чистых растворителей на изученные пленки. Известно, что растворители, используемые при заменах лигандов, могут сами вызывать изменения в оболочках квантовых точек и в некоторых случаях выступать в качестве лигандов. Наши исследования показали, что ацетонитрил не вызывает никаких изменений в ИК-спектре, т. е. не способен к замещению в лигандной оболочке. В то же время обработка пленок ККТ алифатическими спиртами в чистом виде приводит к исчезновению сигналов маятниковых протонов и уменьшению интенсивности метиленовых валентных протонов, т. е. они способны к замещению лигандной олеатной оболочки. Это свойство было ранее описано для этих протонных растворителей [22]. Формамид описан в качестве растворителя для халькогенидов и замены лигандов на эти ионы [23]. Неожиданно, формамид в чистом виде оказался крайне эффективным в удалении олеатной оболочки в пленках ККТ PbS. Ранее эффективность замены лигандов связывалась исключительно с протонной природой растворителей, т. е. способностью сгенерировать протон, активирующий отщепление карбоксилат ионов [22]. Полное исчезновение сигналов метиленовых протонов наблюдается в первую минуту. В спектре появляется сигнал карбонильной группы формамида при  $1680 \text{ см}^{-1}$  и широкий сигнал от  $\text{NH}_2$  групп в районе  $3200\text{--}3400 \text{ см}^{-1}$ . Подобное поведение не было описано ранее в

литературе. Формамид присутствует также в больших количествах в спектре пленок после проведения замены лигандов на  $\text{S}^{2-}$  в этом растворителе, при просушке пленок при комнатной температуре и атмосферном давлении. Таким образом, достаточно прочное связывание данного растворителя с пленками и его замещающую способность должны быть учитываемы при использовании данного вещества в роли среды.

### Заключение

В работе были получены тонкие слои коллоидных квантовых точек сульфида свинца со средним диаметром 5 нм, обладающие олеатной оболочкой. Нами предложен новый подход к исследованию скорости замещения, с помощью которого впервые исследована скорость замены лигандов в тонком слое ККТ PbS при замене на йодид-ион в разных растворителях с помощью ИК-Фурье спектроскопии на приставке МНПВО. При замене лигандов на роданид-ионы в ацетонитриле и спиртах проанализирована эффективность замены. Проведено исследование изменение состава оболочек ККТ PbS под воздействием ряда протонных и апротонных растворителей. Впервые было установлено замещение олеатной лигандной оболочки чистым формамидом. Полученные данные должны способствовать направленному созданию фоточувствительных структур на основе коллоидных квантовых точек сульфида свинца с помощью послойного нанесения с заменой лигандов.

Работа выполнена при поддержке  
Министерства науки и высшего образования  
Российской Федерации в рамках соглашения  
№ 075-03-2022-107/10 от 03.11.2022  
(проект № FSMG-2022-0034).

#### 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. Hinds S. et al. Extended SWIR high performance and high definition colloidal quantum dot imagers / Infrared Technology and Applications XLVI. SPIE. 2020. Vol. 11407. P. 11–19.
4. Albaladejo-Siguan M., Baird E. C., Becker-Koch D., Li Y., Rogach A. L., Vaynzof Y. / Advanced Energy Materials. 2021. Vol. 11. № 12. P. 2003457.
5. Mourdikoudis S., Pallares R. M., Thanh N. T. K. / Nanoscale. 2018. Vol. 10. P. 12871.
6. Hens Z., Martins J. C. / Chemistry of Materials. 2013. Vol. 25. P. 1211.
7. López-Lorente Á. I., Mizaikoff B. / TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2016. Vol. 84. P. 97.
8. Sarma D. D., Santra P. K., Mukherjee S., Nag A. / Chem. Mater. 2013. Vol. 25. P. 1222.
9. Skurlov I. D., Korzhenevskii I. G., Mudrak A. S., Dubavik A., Cherevov S. A., Parfenov P. S., Zhang X., Fedorov A. V., Litvin A. P., Baranov A. V. / Materials. 2019. Vol. 12. № 19. P. 3219.
10. Balazs D. M., Dirin D. N., Fang H.-H., Protesescu L., ten Brink G. H., Kooi B. J., Kovalenko M. V., Loi M. A. / ACS Nano. 2015. Vol. 9. № 12. P. 11951.
11. Lin Q., Yun H. J., Liu W., Song H.-J., Makarov N. S., Isaienko O., Nakotte T., Chen G., Luo H., Klimov V. I., Pietryga J. M. / J. Amer. Chem. Soc. 2017. Vol. 139. № 19. P. 6644.
12. Tong X., Wu J., Wang Z. M. Quantum Dot Photodetectors. – Springer International Publishing, 2021.
13. Joo J. H., Merkle R., Maier J. E. / Journal of Power Sources. 2011. Vol. 196. P. 7495.
14. Kim B.-S., Hong J., Hou B., Cho Y., Sohn J. I., Cha S., Kim J. M. / Applied Physics Letters. 2016. Vol. 109. № 6. P. 063901.
15. Бёккер Ю. Спектроскопия. – М.: Техносфера, 2009.
16. Mudunkotuwa I. A., Minshid A. A., Grassian V. H. / Analyst. 2014. Vol. 139. № 5. P. 870.
17. Young A. G., Al-Salim N., Green D. P., McQuil-lan A. J. / Langmuir. 2008. Vol. 24. № 8. P. 3841.
18. Shuklov I. A., Toknova V. F., Lizunova A. A., Razumov V. F. / Materials Today Chemistry. 2020. Vol. 18. P. 100357.
19. Ganeev R. A., Shuklov I. A., Zvyagin A. I., Dyomkin D. V., Bocharova S. I., Popov V. S., Toknova V. F., Lizunova A. A., Ovchinnikov O. V., Razumov V. F. / Optical Materials. 2021. Vol. 121. P. 111499.
20. Shuklov I. A., Toknova V. F., Demkin D. V., Lapushkin G. I., Nikolenko L. M., Lizunova A. A., Brichkin S. B., Vasilets V. N., Razumov V. F. / High Energy Chemistry. 2020. Vol. 54. № 3. P. 183.
21. 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., Murray C. B., Kagan C. R. / J. Amer. Chem. Soc. 2011. Vol. 133. № 39. P. 15753.
22. Hassinen A., Moreels I., De Nolf K., Smet P. F., Martins J. C., Hens Z. / J. Amer. Chem. Soc. 2012. Vol. 134. № 51. P. 20705.
23. Nag A., Kovalenko M. V., Lee J.-S., Liu W., Spokoyny B., Talapin D. V. / J. Amer. Chem. Soc. 2011. Vol. 133. № 27. P. 10612.

PACS: 85., 85.60.-q

## Investigation of ligand exchange in thin films of PbS colloidal quantum dots with FTIR-spectroscopy

I. A. Shuklov<sup>1</sup>, D. V. Dyomkin<sup>1</sup>, V. A. Konavicheva<sup>1</sup>, V. S. Popov<sup>1,2</sup> and V. F. Razumov<sup>1,3,4</sup>

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

<sup>2</sup> Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

<sup>3</sup> Institute of Problems of Chemical Physics RAS  
1 Ac. Semenov Ave., Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia

<sup>4</sup>Moscow State University  
51 Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Received December 06, 2022

***Thin films were prepared from PbS colloidal quantum dots with oleate ligand shell and mean size of 7.3 nm. Rate of the ligand exchange by iodide-ions in thin film of PbS CQDs was studied for the first time in various solvents applying HATR-FTIR spectroscopy. Modification of ligand shells of PbS CQDs in thin films by interaction with some solvents and solutions of thiocyanate was investigated and analyzed. It was demonstrated the ability of formamide to replace oleate ligands in PbS CQDs.***

**Keywords:** lead sulfide, ligand exchange, IR-Fourier spectroscopy, quantum dots.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-35-42

## REFERENCES

1. V. P. Ponomarenko, V. S. Popov and S.V. Popov, *Usp. Prikl. Fiz.* **9** (1), 25 (2021).
2. I. A. Shuklov and V. F. Razumov, *Russ. Chem. Rev.* **89** (3), 379 (2020).
3. S. Hinds et al., Extended SWIR high performance and high definition colloidal quantum dot imagers. *Infrared Technology and Applications XLVI. SPIE* **11407**, 11–19 (2020).
4. M. Albaladejo-Siguan, E. C. Baird, D. Becker-Koch, Y. Li, A. L. Rogach and Y. Vaynzof, *Advanced Energy Materials* **11** (12), 2003457 (2021).
5. S. Mourdikoudis, R. M. Pallares and N. T. K. Thanh, *Nanoscale* **10**, 12871 (2018).
6. Z. Hens and J. C. Martins, *Chemistry of Materials* **25**, 1211 (2013).
7. Á. I. López-Lorente and B. Mizaikoff, *TrAC Trends in Analytical Chemistry* **84**, 97 (2016).
8. D. D. Sarma, P. K. Santra, S. Mukherjee and A. Nag, *Chem. Mater.* **25**, 1222 (2013).
9. I. D. Skurlov, I. G. Korzhenevskii, A. S. Mudrak, A. Dubavik, S. A. Cherevko, P. S. Parfenov, X. Zhang, A. V. Fedorov, A. P. Litvin and A. V. Baranov, *Materials* **12** (19), 3219 (2019).
10. D. M. Balazs, D. N. Dirin, H.-H. Fang, L. Protesescu, G. H. ten Brink, B. J. Kooi, M. V. Kovalenko and M. A. Loi, *ACS Nano* **9** (12), 11951 (2015).
11. Q. Lin, H. J. Yun, W. Liu, H.-J. Song, N. S. Makarov, O. Isaienko, T. Nakotte, G. Chen, H. Luo, V. I. Klimov and J. M. Pietryga, *J. Amer. Chem. Soc.* **139** (19), 6644 (2017).
12. X. Tong, J. Wu and Z. M. Wang, *Quantum Dot Photodetectors*. (Springer International Publishing, 2021).
13. J. H. Joo, R. Merkle and J. E. Maier, *Journal of Power Sources* **196**, 7495 (2011).
14. B.-S. Kim, J. Hong, B. Hou, Y. Cho, J. I. Sohn, S. Cha and J. M. Kim, *Applied Physics Letters* **109** (6), 063901 (2016).
15. J. Boekker, *Spectroscopie*. (Vogel Industrie Medie GmbH, Wuerzburg, 1997).
16. I. A. Mudunkotuwa, A. A. Minshid and V. H. Grassian, *Analyst*. **139** (5), 870 (2014).
17. A. G. Young, N. Al-Salim, D. P. Green and A. J. McQuillan, *Langmuir* **24** (8), 3841 (2008).
18. I. A. Shuklov, V. F. Toknova, A. A. Lizunova and V. F. Razumov, *Materials Today Chemistry* **18**, 100357 (2020).
19. R. A. Ganeev, I. A. Shuklov, A. I. Zvyagin, D. V. Dyomkin, S. I. Bocharova, V. S. Popov, V. F. Toknova, A. A. Lizunova, O. V. Ovchinnikov and V. F. Razumov, *Optical Materials* **121**, 111499 (2021).
20. I. A. Shuklov, V. F. Toknova, D. V. Demkin, G. I. Lapushkin, L. M. Nikolenko, A. A. Lizunova, S. B. Brichkin, V. N. Vasilets and V. F. Razumov, *High Energy Chemistry* **54** (3), 183 (2020).
21. A. T. Fafarman, W.-K. Koh, B. T. Diroll, D. K. Kim, D.-K. Ko, S. J. Oh, X. Ye, V. Doan-Nguyen, M. R. Crump, D. C. Reifsnyder, C. B. Murray and C. R. Kagan, *J. Amer. Chem. Soc.* **133** (39), 15753 (2011).
22. A. Hassinen, I. Moreels, K. De Nolf, P. F. Smet, J. C. Martins and Z. Hens, *J. Amer. Chem. Soc.* **134** (51), 20705 (2012).
23. A. Nag, M. V. Kovalenko, J.-S. Lee, W. Liu, B. Spokoyny and D. V. Talapin, *J. Amer. Chem. Soc.* **133** (27), 10612 (2011).