

ИК-фотодетекторы на основе коллоидных квантовых точек халькогенидов свинца и ртути*

В.Ф. Разумов, С.Б. Бричкин

Разработаны методы высокотемпературного коллоидного синтеза нанокристаллов PbS, HgSe, HgTe, проведен детальный анализ химического состава ядер и оболочек этих нанокристаллов и созданы лабораторные образцы фотодетекторов ближнего и среднего ИК-диапазона на их основе.

Ключевые слова: коллоидные квантовые точки, халькогениды свинца и ртути, ИК-фотодетекторы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-29-20062).

Введение

Для современных средств ИК-визуализации большой интерес представляют ближневолновой (0.8–2 мкм), средневолновой (3–5 мкм) и длинноволновой (8–12 мкм) диапазоны, которые являются окнами прозрачности атмосферы. На сегодняшний день устройства формирования ИК-изображения, основанные на объемных и квантово-размерных эпитаксиальных материалах, доминируют на рынке. Такие полупроводниковые детекторы обеспечивают достаточно высокую чувствительность и быстродействие, но требуют охлаждения до низких температур [1], громоздки и довольно дороги [2].

В последнее десятилетие проводятся активные исследования систем ИК-визуализации, основные направления которых связаны с повышением рабочей температуры и использованием более дешевых материалов и технологий [3]. ИК-фотодетекторы на полупроводниковых коллоидных квантовых точках (ККТ) вызывают большой интерес, так как они являются удобной и достаточно недорогой альтернативой существующим системам [4].

В данной работе представлены результаты исследований методов высокотемпературного коллоидного синте-

за нанокристаллов селенида ртути HgSe, теллурида ртути HgTe и сульфида свинца PbS и изучения лабораторных образцов ИК-фотодетекторов ближнего и среднего ИК-диапазона в спектральной области от 0.7 до 3 мкм.

Результаты и обсуждение

ККТ сульфидов, селенидов и теллуридов свинца и ртути позволяют перекрыть широкий спектральный диапазон от видимого до инфракрасного света, в том числе ближний и средневолновой ИК-диапазон от 0.8 до 5 мкм [5, 6], который имеет большое практическое значение для волоконно-оптических линий связи, приборов ночного видения, а также широко используется в пирометрах и газовых анализаторах, контролирующих уровень различных загрязнений.

Наиболее хорошо изучен синтез ККТ PbS, положение длинноволнового экситонного максимума которых ограничено 2 мкм. Более длинноволновым поглощением обладают ККТ селенида и теллурида ртути, однако их синтез изучен намного хуже. Поэтому в процессе выполнения проекта были предприняты попытки оптимизировать условия получения ККТ такого состава.

Синтез коллоидных квантовых точек сульфида свинца

При разработке методики получения ККТ PbS в качестве прототипа использовали данные из [7]. Для синтеза в реакционном сосуде смесь 0.404 г (1.45 ммоль) PbCl₂ и 4.1 мл олеиламина (ОА) нагревали до 100 °С и сушили в течение 60 мин под вакуумом, после чего температуру повышали до 125 °С и продували аргоном в течение 30 мин. В другой колбе аналогичным образом готовили смесь 0.083 г (0.36 ммоль) дифенилтио-



РАЗУМОВ
Владимир Фёдорович
профессор, член-корреспондент
РАН,
Федеральный исследовательский
центр проблем химической физики
и медицинской химии РАН



БРИЧКИН
Сергей Борисович
Федеральный
исследовательский центр
проблем химической физики и
медицинской химии РАН

мочевины (ДФТМ) и 1.8 мл 1-октадецена (ОД), аргоном продували при 120 °С. Затем реакционные сосуды охлаждались до температуры, необходимой для получения ККТ заданного размера, и их содержимое смешивалось. Для получения частиц со средним диаметром 3–3.5 нм синтез проводили при 40 °С в течение 40 с, а синтез ККТ с размером около 5 нм проходил при 105 °С в течение 2 мин. После образования частиц нужного размера в реактор заливали охлажденную смесь 7 мл толуола и 17.5 мл этанола, затем в рубашку реакционного сосуда заливалась ледяная вода. Полученную дисперсию осаждали на центрифуге (3 000 мин⁻¹, 5 мин) и удаляли надосадочную жидкость. Осадок растворяли в растворе олеиновой кислоты (ОК) в толуоле (1.5:10 об.), добавляли осаждающий растворитель (этанол) (1:1.5 об.) и снова осаждали на центрифуге (3 000 мин⁻¹, 5–10 мин). Процедуру повторяли три раза, после чего полученный осадок растворяли в тетрахлорэтилене (ТХЭ). Таким образом, промывка ККТ была совмещена с заменой лигандов, и в результате получались ККТ, стабилизированные лигандной оболочкой, состоящей из молекул ОК.

На *рис. 1* представлены спектры поглощения ККТ PbS двух разных средних размеров (3±0.2 и 4.4±0.2 нм) и спектр люминесценции ККТ PbS со средним размером 3±0.2 нм.

Синтез коллоидных квантовых точек селенида ртути

ККТ HgSe были синтезированы в соответствии с методом, описанным в [8]. Прекурсор селена (ТОР-Se) был получен растворением элементарного селена (0.39 г, 5 ммоль) в 5 мл триоктилфосфина (ТОР) под аргоном в сосуде Шленка. Реакционную смесь перемешивали при 70 °С в течение 1 часа, после чего охлаждали до комнатной температуры.

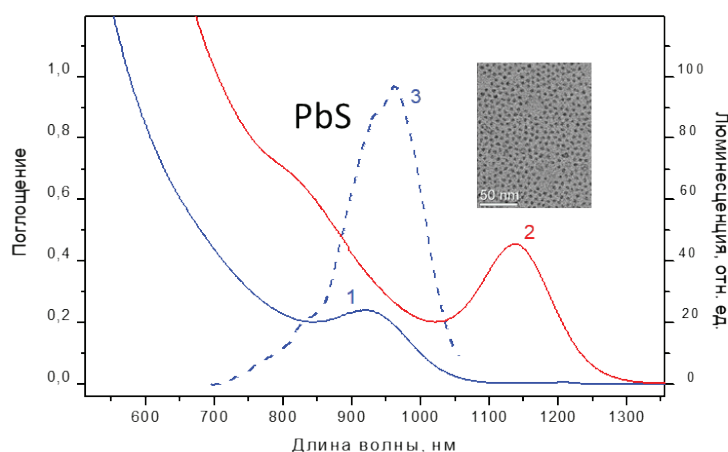


Рис. 1. Спектры поглощения ККТ PbS: 1 – $d_{\text{средн}} = 3 \pm 0.2$ нм; 2 – $d_{\text{средн}} = 4.4 \pm 0.2$ нм; 3 – спектр люминесценции ККТ PbS ($d_{\text{средн}} = 3 \pm 0.2$ нм) в ТХЭ, $\lambda_{\text{возб}} = 627$ нм. На вставке показана ТЕМ микрофотография образца ККТ с размером 4.4 нм.

Синтез ККТ HgSe проводился в трехгорлой колбе объемом 25 мл, в которой смесь (0.2 г, 0.6 ммоль) Hg(OAc)₂ и 2 мл ОК перемешивали при $T = 100$ °С в течение 30 мин. Далее добавили 6 мл ОА и продолжили перемешивание при $T = 100$ °С еще в течение 30 мин. К этой смеси добавили 0.3 мл ТОР-Se, и синтез проводили в течение 5 мин при 100 °С. Синтез останавливали добавлением 1 мл 1-додекантиола (ДДТ) и резким охлаждением до комнатной температуры. ККТ выделяли двукратным осаждением метанолом и диспергированием в ТХЭ. На *рис. 2* показан спектр поглощения раствора ККТ HgSe в ТХЭ.

Синтез коллоидных квантовых точек теллурида ртути

Синтез ККТ HgTe проводили на основе методики [9], которую существенно модифицировали.

Для приготовления прекурсора теллура (ТОР-Te) в круглодонную колбу помещали 2.54 г порошка теллура и 20 мл ТОР и сушили в течение 1 часа при комнатной температуре при постоянном перемешивании в вакууме, затем в токе аргона нагревали до 275 °С и после образования прозрачного оранжевого раствора охлаждали до комнатной температуры.

В реакционный сосуд помещали 54.3 мг HgCl₂ и 8 мл ОА. Смесь нагревали до 100 °С и дегазировали в течение 1 ч., после чего в течение 15 мин. продували аргоном и впрыскивали 0.2 мл ТОР-Te. Синтез проводили при 100 °С в течение 20 минут. Полу-

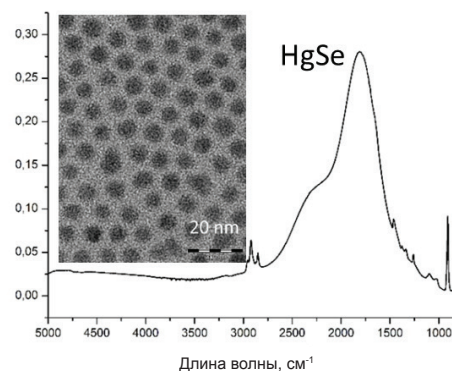


Рис. 2. Спектры поглощения ККТ HgSe в ТХЭ. На вставке – ТЕМ-микрофотография этих наночастиц.

ченные ККТ диспергировали в смеси ДДТ/ТОР/ТХЭ (2.5:1:25 об.), добавляли метанол (1:1 об.) и центрифугировали ($3\,000\text{ мин}^{-1}$) до полного осаждения ККТ. Образовавшийся осадок диспергировали в 10 мл ТХЭ, в который для повышения стабильности дисперсии и предотвращения агрегации частиц добавляли 50 мкл ДДТ. На рис. 3 показан спектр поглощения ККТ HgTe и их ПЭМ-микрофотография.

Измерение оптических и фотоэлектrofизических характеристик

Оптические спектры поглощения синтезируемых ККТ измеряли на спектрофотометрах V770-JASCO и Shimadzu UV 3101PC в диапазоне от 400 до $3\,500\text{ нм}$. Спектры люминесценции для ККТ PbS регистрировали на оптоволоконном спектрофлуориметре Ocean Optics USB2000 FLG. Состав лигандной оболочки ККТ был изучен с помощью Фурье-ИК-спектроскопии (FTIR; Spectrum 100, PerkinElmer). Морфология и размер полученных наночастиц были исследованы на просвечивающем электронном микроскопе. (TEM; JEM-2100, JEOL).

Измерение фотоэлектrofизических характеристик лабораторных образцов фотодетекторов проводились на установке (рис. 4), которая включает в себя источник питания АКПП-1142/3G, универсальный вольтметр АКПП В7-78/1, цифровой осциллограф Hantek DSO4254C и модуль, объединяющий в себе трансимпедансный усилитель (ТИУ) и селективный перестраиваемый LC-фильтр. Установка позволяет измерять вольтамперные характеристики (ВАХ) образцов по постоянному и переменному току, их ампер-ваттную чувствительность и обнаружительную способность. В качестве источника света использовались полупроводниковый лазер ($\lambda=0.98\text{ мкм}$) с электронной TTL-модуляцией от генератора импульсов цифрового осциллографа, или имитатор абсолютно черного тела (АЧТ) Heimann EMIRS200 ($T_M=450\text{ °C}$, $\lambda_{\text{max}}\approx 4.0\text{ мкм}$) с механооптическим модулятором, работающим на частоте 500 Гц .

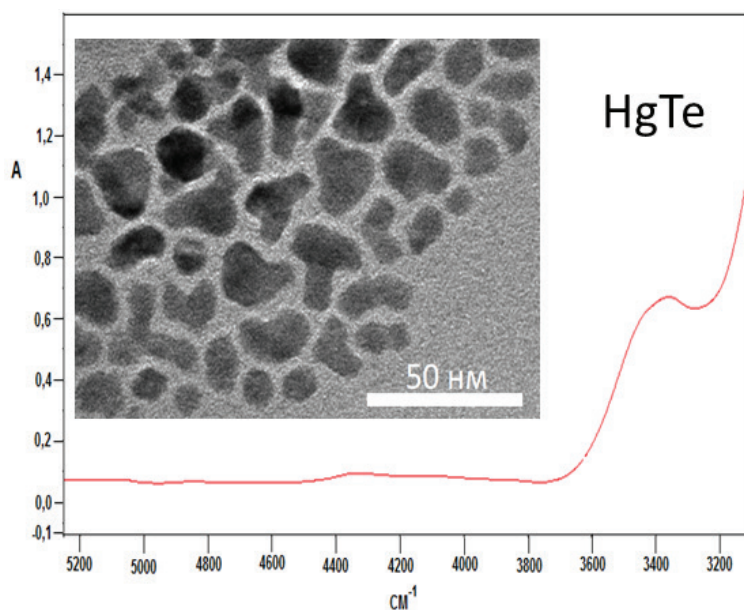


Рис. 3. Спектры поглощения ККТ HgTe в ТХЭ. На вставке – ТЕМ-микрофотография этих наночастиц.

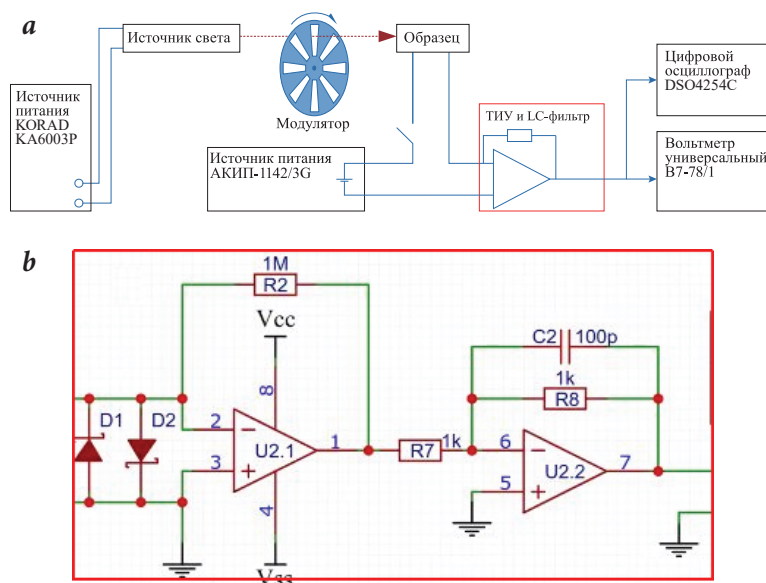


Рис. 4. Схема установки для измерения фотоэлектrofизических характеристик: а – общая, б – модуля ТИУ и LC-фильтра.

Изготовление фоторезисторов на основе тонких пленок ККТ

Лабораторные образцы ИК-фотодетекторов представляли собой фоторезисторы, которые изготавливались путем нанесения тонких пленок ККТ на подложки с золотыми гребенчатыми электродами, методом dip-coating [10] – погружением предварительно тщательно промытых подложек в раствор ККТ в тетрагидрофуране (ТХЭ) и медленным извлечением пластинок из раствора. Контроль скорости движения пластинок осуществлялся с помощью инфузионного насоса. Скорость движения пластинки варьировалась в пределах $20\text{--}90\text{ мм/мин}$. Оптимальной оказалась скорость 80--

90 мм/мин. Концентрация ККТ в поливном растворе варьировалась от 1 до 10 мкМ.

Так как спектры поглощения слоев ККТ, нанесенных на электроды, регистрировать затруднительно, то параллельно с изготовлением образцов фотодетекторов на стеклянные подложки в аналогичных условиях наносились контрольные слои ККТ. Это позволяло контролировать оптическую плотность и толщину фоточувствительных слоев фотодетекторов. На рис. 5, в качестве примера, показаны спектры поглощения серии слоев ККТ PbS на стеклянной подложке.

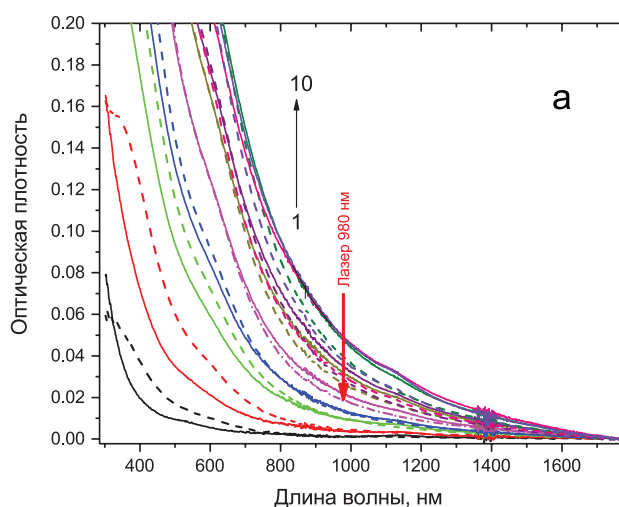


Рис. 5. Спектры поглощения 10 контрольных слоев ККТ PbS, последовательно нанесенных на стеклянную подложку параллельно с нанесением слоев на пластинку с гребенчатыми электродами. Штриховые линии соответствуют спектрам слоев до замены, сплошные линии – после замены лигандов.

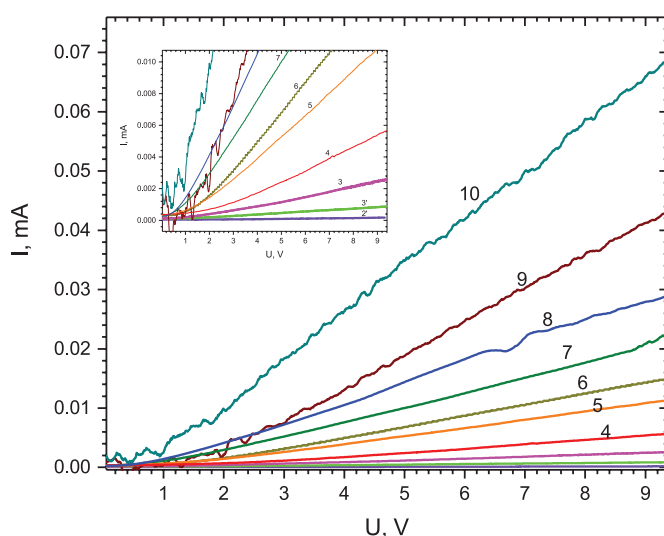


Рис. 6. Изменения ВАХ экспериментального образца фотодетектора в процессе последовательного нанесения фотопроводящих слоев ККТ (номера кривых соответствуют числу нанесенных слоев). ВАХ 2' и 3' измерены при освещении светом лазера 520 нм; ВАХ 3–10 – при освещении ИК-лазером 980 нм. На врезке показаны начальные участки ВАХ в увеличенном масштабе по оси ординат.

Фотодетекторы на основе ККТ PbS

Слои ККТ PbS наносились методом dip-coating. Толщина одинарного слоя, оцененная из спектра поглощения, составила около 7.5 нм. Для уменьшения расстояния между ККТ PbS и создания фотопроводимости в слое проводилась замена молекул ОК на ионы S^{2-} . Детали изготовления образцов и проведения электрофизических измерений подробно представлены в работе [11]. ВАХ для фотодетекторов на ККТ PbS со средним размером наночастиц 4.4 ± 0.2 нм представлены на рис. 6.

После нанесения первого слоя ККТ образец не проявлял светочувствительности. Это, вероятно, связано с возможными дефектами (трещинами и разрывами) слоя, которые нередко проявляются в очень тонких слоях толщиной менее 10 нм и нарушают их целостность. После нанесения последующих слоев фоточувствительность появилась. Образец с двумя и тремя слоями облучался лазером с длиной волны 520 нм. Начиная с трех слоев и далее использовался ИК-лазер с длиной волны излучения 980 нм. Обнаружено, что образец обладает более эффективным фотооткликом к излучению ИК-лазера 980 нм по сравнению со светом лазера 520 нм (кривые 3' и 3). Показано также, что по мере увеличения толщины фоточувствительного слоя фотодетектора его приведенная к поглощенному свету фотопроводимость в 6 раз возрастает с увеличением толщины рабочего слоя ККТ, что доказывает улучшение качества слоя при последовательном его наращивании методом dip-coating.

Фотодетекторы на основе ККТ HgSe

Для фотодетекторов на ККТ HgSe было исследовано влияние различных типов короткоцепочечных лигандов: 1,2-этандитиола (ЭДТ), бензолдитиола (BeSH), сульфида натрия (Na_2S) и роданида аммония (NH_4SCN) на светочувствительные характеристики [12]. Фотоактивные слои ККТ последовательно наносились на электроды методом

dip-coating с последующей обработкой в растворе соответствующего лиганда для замены исходных длинноцепочечных лигандов, использованных при синтезе ККТ. Для образцов измерены ВАХ и зависимости ампер-ваттной чувствительности и обнаружительной способности фотоприемников от напряжения смещения (рис. 7).

В результате было установлено, что при обработке в растворе роданида достигаются максимальные величины ампер-ваттной чувствительности и обнаружительной способности, и соответствующие значения составили 0.5 А/Вт и $3.1 \cdot 10^7$ Джонс.

Фотодетектор на основе ККТ HgTe

На лабораторных образцах фотодетекторов на ККТ HgTe были проведены исследования их фотоэлектрофизических характеристик в процессе последовательного нанесения методом dip-coating до 36 слоев ККТ HgTe с заменой исходных длинноцепочечных молекул, составляющих их лигандные оболочки, на короткие молекулы 1,2-этандитиола [13]. Измерены их электрофизические характеристики на разных этапах изготовления по мере увеличения количества нанесенных слоев. Установлено, что полученный фотодетектор обладает чувствительностью как к свету лазера с длиной волны 980 нм, так и к излучению имитатора абсолютно черного тела (АЧТ, $T_M = 450^\circ\text{C}$, $\lambda_{\text{max}} \approx 4.0$ мкм), то есть

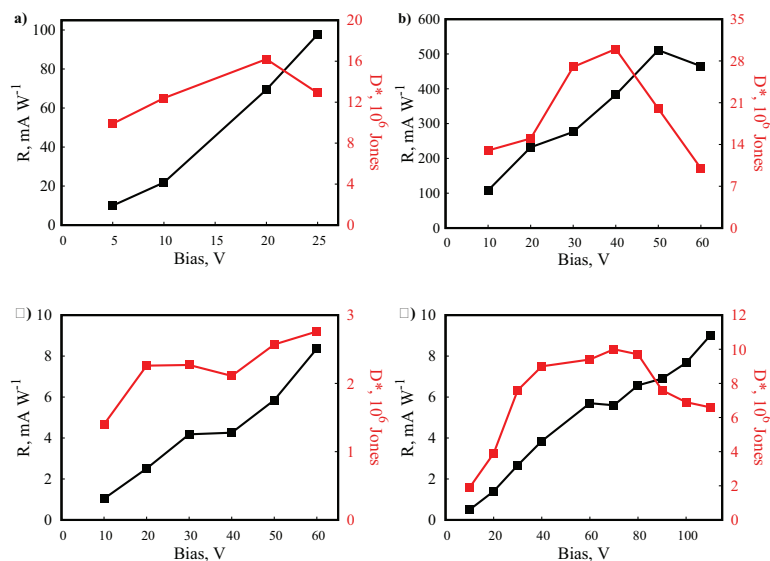


Рис. 7. Зависимости ампер-ваттной чувствительности и обнаружительной способности образцов от напряжения с различными лигандами: а – Na_2S ; б – NH_4SCN ; в – ЭДТ; д – BeSH.

ближнего и среднего ИК-диапазонов.

Обнаружено, что с ростом количества нанесенных слоев (вплоть до 36) ампер-ваттная чувствительность фотодетектора монотонно растет, а максимум обнаружительной способности достигается на образце с 25 нанесенными слоями, что объясняется преобладающим ростом тока тепловых шумов в образцах с количеством слоев, превышающим 25. Следует отметить, что даже для образца из 36 слоев на длине волны излучения лазера 980 нм поглощается около 6% падающего излучения. Поэтому здесь приводятся нормированные на поглощенную энергию величины интегральной ампер-ваттной чувствительности S_{IA} и обнаружительной способности D_A^* , которые достигают максимально $1.5 \cdot 10^6$ Джонс (лазер 980 нм) и около $2 \cdot 10^5$ Джонс (АЧТ, $T=450^\circ\text{C}$), а ампер-ваттная чувствительность составляет $3 \cdot 10^{-2}$ А/Вт (рис. 8).

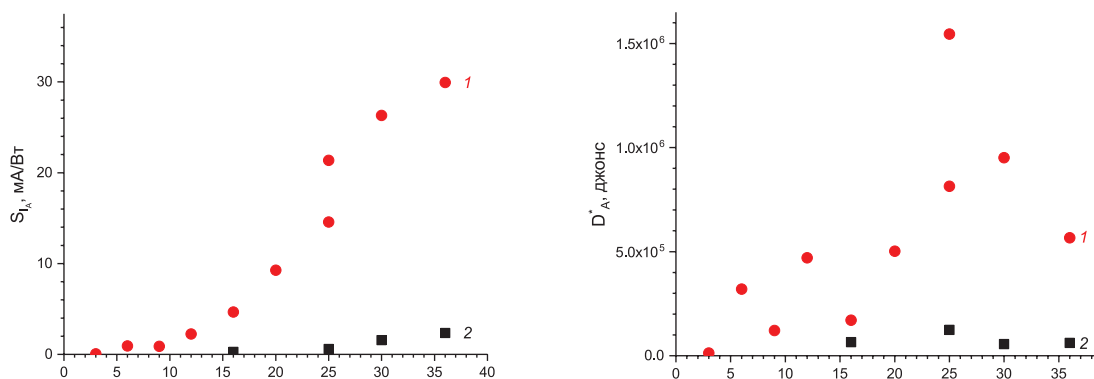


Рис. 8. Фотоэлектрические характеристики образцов фотодетекторов на ККТ HgTe, нормированные на поглощенную энергию: а – интегральная ампер-ваттная чувствительность S_{IA} при напряжении смещения $U_0 = 10$ В, в зависимости от числа слоев n: (●) – для лазерного излучения; (■) – для излучения АЧТ; б – обнаружительная способность D_A^* при напряжении смещения $U_0 = 10$ В, в зависимости от числа слоев n: (●) – для лазерного излучения; (■) – для излучения АЧТ.

Заключение

В результате выполнения данного проекта были разработаны методы синтеза ККТ на основе сульфида свинца, селенида и теллурида ртути, которые могут обеспечивать селективное действие фотоприемников в заданной достаточно узкой спектральной области видимого, ближне- и средневолнового ИК-диапазона. Проведена оптимизация постсинтетической обработки ККТ с целью получения коллоидно-стабильных суспензий ККТ для последующего нанесения оптически однородных слоев ККТ методом dip-coating на твердые подложки.

Были созданы лабораторные образцы ИК-фотодетекторов на основе ККТ сульфида свинца, селенида и теллурида ртути, обладающие чувствительностью в диапазоне длин волн 1–3 мкм.

Установлено, что для лабораторного образца фотодетектора на ККТ HgTe с заменой лигандов на EDT максимальная обнаружительная способность составляет 1.5×10^6 Джонс при засветке ИК-лазером ($\lambda = 980$ нм) и 2×10^5 Джонс для АЧТ ($T = 450$ °C), а ампер-ваттная чувствительность при напряжении $U = 10$ В составляет 3×10^{-2} А/Вт.

Исследовано влияние различных пассивирующих лигандов на фотоэлектрические характеристики ИК фотодетектора, изготовленного на основе ККТ HgSe. В качестве лигандов были выбраны: 1,2-этандитиол, роданид аммония, 1,2-бензолдитиол и сульфид натрия. Найдены зависимости ампер-ваттной чувствительности

и удельной обнаружительной способности фотодетекторов от напряжения смещения, подаваемого на образец. Было установлено, что максимальные значения ампер-ваттной чувствительности и удельной обнаружительной способности образцов достигаются при замене на роданид. Значения удельной обнаружительной способности и ампер-ваттной чувствительности при комнатной температуре составили 3.1×10^7 Джонс и 0.5 А/Вт соответственно. Полученные величины ампер-ваттной чувствительности превосходят значения, представленные в литературе для фотодетекторов на основе HgSe, а значения удельной обнаружительной способности сопоставимы со значениями, полученными ранее для фотодетекторов на основе таких ККТ. Авторы выражают благодарность коллегам, принимавшим участие в выполнении проекта на разных его этапах: Бочаровой Светлане Ильиничне, Гадомской Анне Владимировне, Гаку Владимиру Юрьевичу, Дёмкину Дмитрию Викторовичу, Кацабе Алексею Викторовичу, Спирину Максиму Геннадьевичу, Шуклову Ивану Алексеевичу.

Литература

1. A. Rogalski
Prog. Quant. Electron., 2012, **36**(2-3), 342.
DOI: 10.1016/j.pquantelec.2012.07.001.
2. C.L. Tan, H. Mohseni
Nanophotonics, 2018, **7**(1), 169.
DOI: 10.1515/nanoph-2017-0061.
3. G. Konstantatos, E.H. Sargent
Infrared Phys. Techn., 2011, **54**, 278.
DOI: 10.1016/j.infrared.2010.12.029.
4. A.P. Litvin, I.V. Martynenko, F. Purcell-Milton, A.V. Baranov, A.V. Fedorov, Y.K. Gun'ko
J. Mater. Chem. A, 2017, **5**, 13252. DOI: 10.1039/c7ta02076g.
5. S.B. Hafiz, M. Scimeca, A. Sahu, D.-K. Ko
Nano Convergence, 2019, **6**(7).
DOI: 10.1186/s40580-019-0178-1.
6. E. Lhuillier, S. Keuleyan, H. Liu, P. Guyot-Sionnest
Chem. Mater., 2013, **25**, 1272. DOI: 10.1021/cm303801s.
7. S. Chan, M. Liu, K. Latham, M. Haruta, H. Kurata, T. Teranishic, Y. Tachibana
J. Mater. Chem. C, 2017, **5**, 2182. DOI: 10.1039/c6tc05329g.
8. A. Robin, C. Livache, S. Ithurria, E. Lacaze, B. Dubertret, E. Lhuillier
ACS Appl. Mater. Inter., 2016, **8**(40), 27122.
DOI: 10.1021/acsami.6b09530.
9. S. Keuleyan, E. Lhuillier, P. Guyot-Sionnest
J. Am. Chem. Soc., 2011, **133**(41), 16422. DOI: 10.1021/ja2079509.
10. T. Shen, J. Yuan, X. Zhong, J. Tian
J. Mater. Chem. C, 2019, **7**(21), 6266. DOI: 10.1039/C9TC00079H.
11. С.Б. Бричкин, В.Ю. Гак, М.Г. Спирин, А.В. Гадомская, С.И. Бочарова, В.Ф. Разумов
Хим. выс. энергий, 2020, **54**(1), 43.
DOI: 10.1134/S0023119320010039.
12. D. Sokolova, D.V. Dyomkin, A.V. Katsaba, S.I. Bocharova, V.F. Razumov
Infrared Phys. Techn., 2022, **123**(3), 104188.
DOI: 10.1016/j.infrared.2022.104188.
13. В.Ю. Гак, А.В. Гадомская, М.Г. Спирин, Д.Н. Певцов, А.В. Кацаба, С.Б. Бричкин, В.Ф. Разумов
Хим. выс. энергий, 2022, **56**(2), 104.
DOI: 10.31857/S0023119322020036.

English

IR Photodetectors Based on Lead and Mercury Chalcogenides Colloidal Quantum Dots*

Vladimir F. Razumov

Professor, RAS Corresponding Member,
Federal Research Center of Problems of
Chemical Physics
and Medicinal Chemistry, RAS
1 Semenov Ave., Chernogolovka, 142432,
Moscow region, Russia
razumovvf@list.ru

Sergey B. Brichkin

Federal Research Center of Problems of
Chemical Physics
and Medicinal Chemistry RAS
1 Semenov Ave., Chernogolovka, 142432,
Moscow region, Russia
brichkin@icp.ac.ru

Abstract

Methods for high-temperature colloidal synthesis of PbS, HgSe, and HgTe nanocrystals have been developed, a detailed analysis of the chemical composition of the cores and shells of these nanocrystals has been carried out, and laboratory samples of near- and mid-IR photodetectors based on these nanocrystals have been created.

Keywords: colloidal quantum dots, lead and mercury chalcogenides, IR photodetectors.

*The work was financially supported by RFBR (project 18-29-20062).

Images & Tables

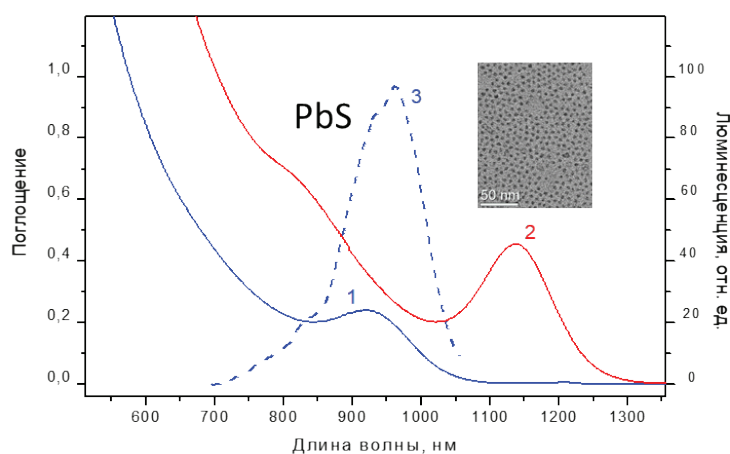


Fig. 1. Absorption spectra of PbS CQDs: 1 – $d_{\text{average}} = 3 \pm 0.2$ nm; 2 – $d_{\text{average}} = 4.4 \pm 0.2$ nm; 3 – luminescence spectrum of PbS CQDs ($d_{\text{average}} = 3 \pm 0.2$ nm) in TCE, $\lambda_{\text{exc}} = 627$ nm. The inset shows a TEM micrograph of a CQD sample with a size of 4.4 nm.

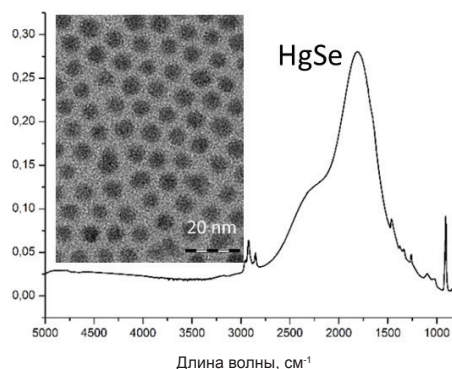


Fig. 2. Absorption spectra of HgSe CQDs in TCE. The inset shows a TEM micrograph of these nanoparticles.

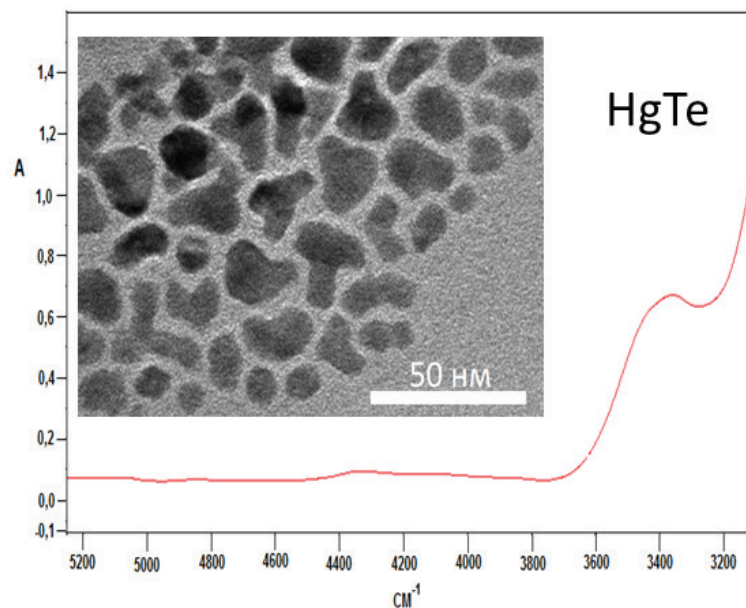


Fig. 3. Absorption spectra of HgTe CQDs in TCE. The inset shows a TEM micrograph of these nanoparticles.

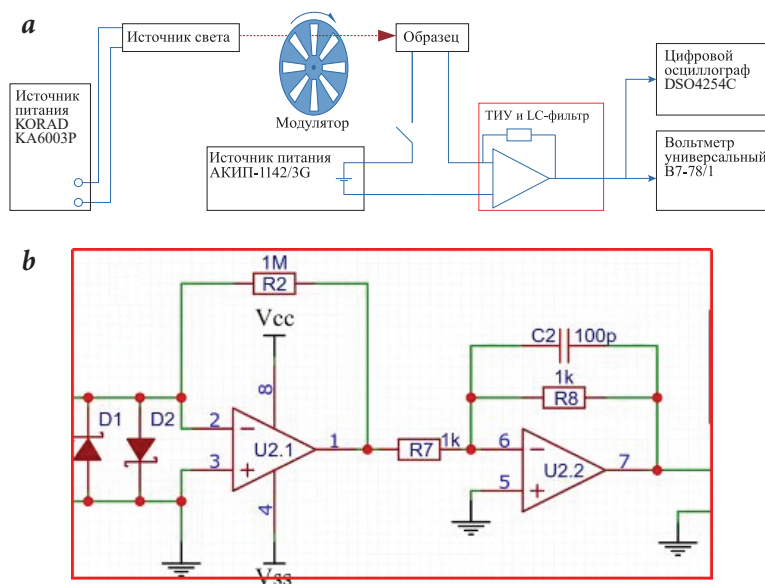


Fig. 4. Schematic of the equipment for measuring of photoelectrophysical characteristics: a – general, b – TIU module and LC-filter.

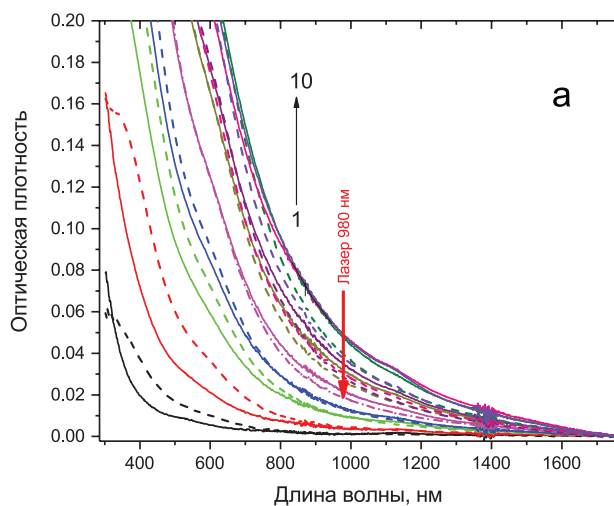


Fig. 5. Absorption spectra of 10 control layers of PbS CQDs deposited sequentially on a glass substrate in parallel with the deposition of layers on a glass plate with interdigital electrodes. The dashed lines correspond to the spectra of the layers before replacement, and solid lines after the replacement of ligands.

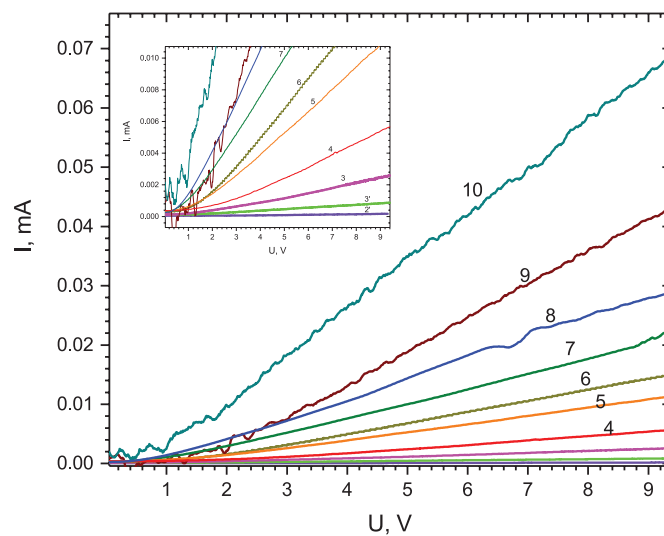


Fig. 6. Changes in the current-voltage (IV) characteristics of the experimental sample of the photodetector during the sequential drawing of photoconductive layers of CQDs (curve numbers correspond to the number of deposited layers). I–V characteristics 2' and 3' were measured under illumination with 520 nm laser light; I–V characteristics 3–10 are under illumination with 980 nm IR laser. The inset shows the initial areas of the IV characteristics on an enlarged scale along the y-axis.

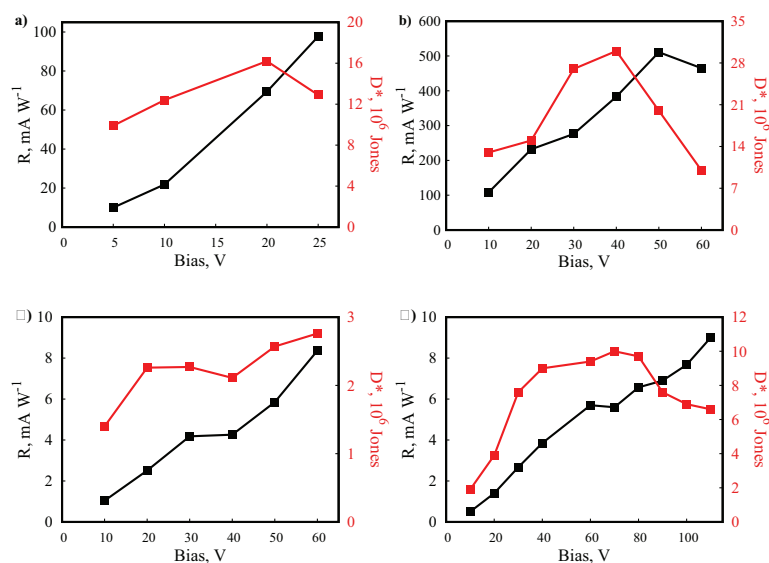


Fig. 7. Dependences of the ampere-watt sensitivity and detectivity on voltage for samples with different ligands: a – Na_2S ; b – NH_4SCN ; c – EDT; d – BeSH.

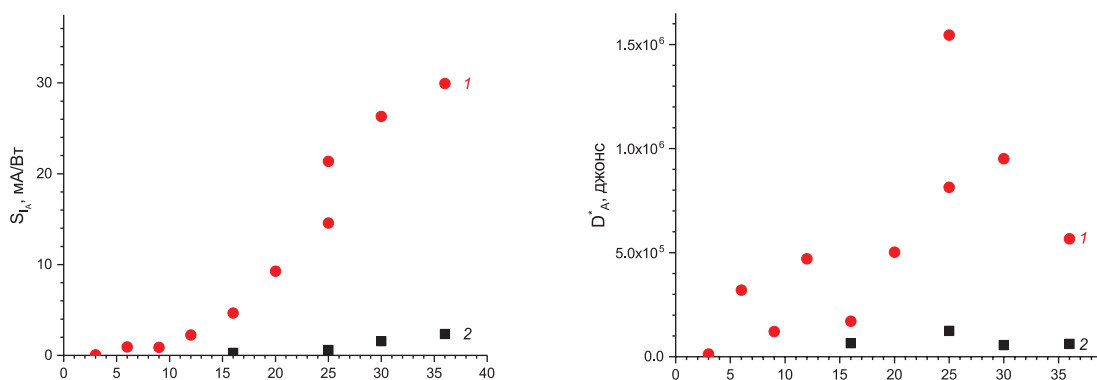


Fig. 8. Photoelectric characteristics photodetector samples based on HgTe CQDs, normalized to the absorbed energy: a – integrated ampere-watt sensitivity S_A at bias voltage $U_0=10$ V, depending on the number of layers n : (●) – for the laser irradiation; (■) – for blackbody irradiation; b – detectivity D_A at bias voltage $U_0=10$ V, depending on the number of layers n : (●) – for a laser irradiation; (■) – for blackbody irradiation.

References

1. A. Rogalski
Prog. Quant. Electron., 2012, **36**(2-3), 342.
DOI: 10.1016/j.pquantelec.2012.07.001.
2. C.L. Tan, H. Mohseni
Nanophotonics, 2018, **7**(1), 169. DOI: 10.1515/nanoph-2017-0061.
3. G. Konstantatos, E.H. Sargent
Infrared Phys. Techn., 2011, **54**, 278.
DOI: 10.1016/j.infrared.2010.12.029.
4. A.P. Litvin, I.V. Martynenko, F. Purcell-Milton, A.V. Baranov, A.V. Fedorov, Y.K. Gun'ko
J. Mater. Chem. A, 2017, **5**, 13252.
DOI: 10.1039/c7ta02076g.
5. S.B. Hafiz, M. Scimeca, A. Sahu, D.-K. Ko
Nano Convergence, 2019, **6**(7).
DOI: 10.1186/s40580-019-0178-1.
6. E. Lhuillier, S. Keuleyan, H. Liu, P. Guyot-Sionnest
Chem. Mater., 2013, **25**, 1272. DOI: 10.1021/cm303801s.
7. S. Chan, M. Liu, K. Latham, M. Haruta, H. Kurata, T. Teranishic, Y. Tachibana
J. Mater. Chem. C, 2017, **5**, 2182. DOI: 10.1039/c6tc05329g.
8. A. Robin, C. Livache, S. Ithurria, E. Lacaze, B. Dubertret, E. Lhuillier
ACS Appl. Mater. Inter., 2016, **8**(40), 27122.
DOI: 10.1021/acsami.6b09530.
9. S. Keuleyan, E. Lhuillier, P. Guyot-Sionnest
J. Am. Chem. Soc., 2011, **133**(41), 16422. DOI: 10.1021/ja2079509.
10. T. Shen, J. Yuan, X. Zhong, J. Tian
J. Mater. Chem. C, 2019, **7**(21), 6266. DOI: 10.1039/C9TC00079H.
11. S.B. Brichkin, V.Yu. Gak, M.G. Spirin, A.V. Gadomska, S.I. Bocharova, V.F. Razumov
High Energy Chem., 2020, **54**(1), 36.
DOI: 10.1134/S0018143920010038.
12. D. Sokolova, D.V. Dyomkin, A.V. Katsaba, S.I. Bocharova, V.F. Razumov
Infrared Phys. Techn., 2022, **123**(3), 104188.
DOI: 10.1016/j.infrared.2022.104188.
13. V.Yu. Gak, A.V. Gadomska, M.G. Spirin, D.N. Pevtsov, A.V. Katsaba, S.B. Brichkin, V.F. Razumov
High Energy Chem., 2022, **56**(2), 91.
DOI: 10.1134/S0018143922020035.