



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 53.043, 535.015, 535.33

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11100>

Фотоэлектрический отклик в сэндвич-структурах на основе конденсированных слоев квантовых точек Ag_2S , пассивированных тиогликолевой кислотой

В. С. Гурченко¹, А. С. Мазинов¹, М. С. Смирнов^{2✉}, И. Г. Гревцева², Л. П. Нестеренко², О. В. Овчинников²

¹Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, просп. Академика Вернадского, 4, Симферополь 295007, Республика Крым, Российская Федерация

²Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

Аннотация

Исследование направлено на разработку методики формирования структур с барьером Шоттки в виде многослойной сэндвич-структуры Al- Ag_2S -ITO, в состав которой в качестве фоточувствительного элемента входит конденсат коллоидных квантовых точек Ag_2S , пассивированных молекулами тиогликолевой кислоты (КТ Ag_2S /TGA).

Спектральные свойства исследовали с помощью спектрометра USB2000+ (Ocean Optics, USA) с источником излучения USB-DT (Ocean Optics, USA). Электрофизические и фотоэлектрические свойства исследуемых структур измерялись анализатором полупроводников Keysight B1500A (Keysight Technologies, США). Исследование температурных зависимостей этих свойств в диапазоне от 300 до 360 К реализовано в экранированной камере (клетка Фарадея), помещенной в муфельную печь.

Установлено, что проводимость структуры Al- Ag_2S -ITO преимущественно определяется барьером Шоттки на границе Al-плёнка конденсата КТ Ag_2S . На границе раздела плёнка конденсата КТ Ag_2S -Al найдены признаки образования выпрямляющего контакта.

Под действием оптического излучения с длиной волны 650 нм и менее, соответствующей наиболее вероятному экситонному переходу в оптическом поглощении света КТ Ag_2S /TGA для отрицательной ветви ВАХ, найдено увеличение тока.

Ключевые слова: сульфид серебра, энергия активации, подвижность носителей заряда, механизмы проводимости, барьер Шоттки

Источник финансирования: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 22-12-00232.

Для цитирования: Гурченко В. С., Мазинов А. С., Смирнов М. С., Гревцева И. Г., Нестеренко Л. П., Овчинников О. В., Фотоэлектрический отклик в сэндвич-структурах на основе конденсированных слоев квантовых точек Ag_2S , пассивированных тиогликолевой кислотой. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(2): 190–197. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11100>

For citation: Gurchenko V. S., Mazinov A. S., Smirnov M. S., Grevtseva I. G., Nesterenko L. P., Ovchinnikov O. V. Photoelectric response in sandwich structures based on condensed Ag_2S quantum dots passivated with thioglycolic acid. *Condensed Matter and Interphases*. 2023;25(2): 190–197. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11100>

✉ Смирнов Михаил Сергеевич, e-mail: smirnov_m_s@mail.ru

© Гурченко В. С., Мазинов А. С., Овчинников О. В., Смирнов М. С., Гревцева И. Г., Нестеренко Л. П., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

В последние годы большой интерес проявляется к оптическим и транспортным свойствам наноструктур, построенных на основе полупроводниковых коллоидных квантовых точек (КТ). Благодаря существованию КТ в виде ансамблей в коллоидных растворах, имеется возможность получения необходимых для реализации практических приложений тонких слоев - конденсатов различными методами, такими как спин-коатинг, дип-коатинг, технология Лэнгмюра-Блоджетт и т. п. [1–4]. При этом на первый план выходит проблема транспортных свойств в подобных конденсатах и их связи, как с энергетическими и электрофизическими свойствами компонентов (подложек, электродов и т. п.), так и с оптическими свойствами конденсатов КТ [5, 6].

Оптические, электрофизические и рекомбинационные свойства, а также технологичность изготовления конденсатов КТ важны для разработки новых фотодетекторов [2] и других устройств фотоники. Применение КТ в устройствах фотовольтаики имеет преимущества, связанные с возможностью тонкой настройки энергетических уровней элемента, модификации поверхности для увеличения эффективности поглощения света, в том числе в ближнем инфракрасном диапазоне [7–9]. Правильный выбор поверхностного лиганда КТ позитивно сказывается на транспортных свойствах конденсатов [6, 7, 10]. К настоящему времени установлено, что использование более коротких лигандов обеспечивает формирование концентрированных слоев конденсатов КТ, в которых эффективность диффузии зарядов между соседними КТ существенно облегчается. Тиокарбоновые кислоты имеют высокую перспективу успешного использования для подобного рода задач [11]. Однако исследования электрофизических фотовольтаических свойств КТ, пассивированных подобным лигандом, очень малочисленны [12]. В свою очередь, определенный интерес представляют для исследования в качестве модельных фоточувствительных сред конденсаты КТ Ag_2S . Для них известны подходы и технологии эффективной пассивации интерфейсов тиокарбоновыми кислотами [13–26].

Возможности создания новых тонкопленочных систем на основе конденсатов КТ Ag_2S отмечены в нескольких работах [27–29]. Так, добавление сульфида серебра в качестве изолирующего слоя в диоде типа «Шоттки» показало улучшение его характеристик, повышение ско-

рости выпрямления [29]. Однако систематические исследования проводящих свойств, фотоотклика и определяющих их закономерностей фотопроцессов в системах на основе конденсатов КТ Ag_2S , пассивированных короткоцепочечными молекулами тиокарбоновых кислот к настоящему моменту времени отсутствуют.

Данная работа частично восполняет этот пробел и посвящена анализу электрофизических свойств и фотоотклика в многослойных структурах типа Al- Ag_2S -ITO, в состав которых в качестве фоточувствительного элемента входит конденсат коллоидных квантовых точек Ag_2S , пассивированных молекулами тиогликолевой кислоты (далее КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$).

2. Экспериментальная часть

2.1. Образцы для исследований

Исследование электрических параметров и фотоотклика производили на сэндвич-структурах Al-КТ Ag_2S -ITO [30]. Исходный коллоидный раствор КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ в объеме 0.4 мл наносили на проводящие подложки оксида индия-олова (ITO) или алюминия, полученные методом магнетронного напыления. Поверхностное сопротивление подложек не превышало 20 Ом/кВ, геометрические параметры составляли – 10×10 мм.

Образцы коллоидных КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ синтезировали в рамках водного коллоидного синтеза [13–18]. Он основан на смешивании водных растворов AgNO_3 и TGA в молярном соотношении 1:1 с водным раствором Na_2S , концентрация которого соответствовала молярному соотношению $\text{AgNO}_3:\text{TGA}:\text{Na}_2\text{S}$, равному 1:1:0.33. Для синтеза использовали реактивы марки ОСЧ компании Sigma-Aldrich.

2.2. Методики экспериментальных исследований

Морфологию КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ исследовали с помощью просвечивающих электронных микроскопов (ПЭМ) Libra 120 (CarlZeiss, Germany) и JEOL 2000FX (JEOLLtd., Japan) – ПЭМ высокого разрешения. Оценку морфологии поверхности тонких пленок конденсатов КТ Ag_2S осуществляли при помощи отражающей и просвечивающей микроскопии на микроинтерферометре МИИ-4М (ЛОМО, Россия).

Исследование абсорбционных свойств осуществляли спектрометром USB2000+ (Ocean Optics, USA) с источником излучения USB-DT (Ocean Optics, USA).

Электрофизические и фотоэлектрические свойства исследуемых структур измерялись ана-

лизатором полупроводников Keysight B1500A (Keysight tech, США). Исследование температурных зависимостей этих свойств в диапазоне от 300 до 360 К реализовано в экранированной камере (клетка Фарадея), помещенной в муфельную печь. В качестве источника монохроматического излучения использовали лампу накаливания совместно с монохроматом МДР 41 с дифракционной решеткой 1200 nm^{-1} . Рабочий спектральный диапазон составил 500–1300 нм, при мощности падающего на образец излучения 200 мкВт.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Структурные и оптические свойства образцов

Анализ ПЭМ изображений свидетельствует о формировании ансамблей отдельных КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ средним размером 2.5 нм и дисперсией 20 % (рис. 1а). Исследования ПЭМ изображений высокого разрешения показали формиро-

вание нанокристаллов Ag_2S в моноклинной решетке (пространственная группа $P2_1/c$) (рис. 1б). Толщина пленок, установленная интерферометрическим методом для КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$, составила 280–300 нм (рис. 1в).

Полоса оптического поглощения исходных коллоидных растворов КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$, обусловленная наиболее вероятным экситонным переходом, имела максимум в области 1.9 эВ (650 нм). Это значение энергии превышает ширину запрещенной зоны для кристаллов Ag_2S с моноклинной кристаллической структурой, равную 1.0–1.1 эВ (рис. 1г) [31]. Эта особенность – проявление размерного эффекта. Используя формулу Кайянума [32]:

$$\Delta E = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2\mu R^2} - 1.8 \frac{e^2}{\epsilon R} - 0.248 \frac{\mu e^4}{2\epsilon^2 \hbar^2},$$

где $\epsilon = 5.95$ – диэлектрическая проницаемость массивного Ag_2S [33], R – радиус КТ Ag_2S в см,

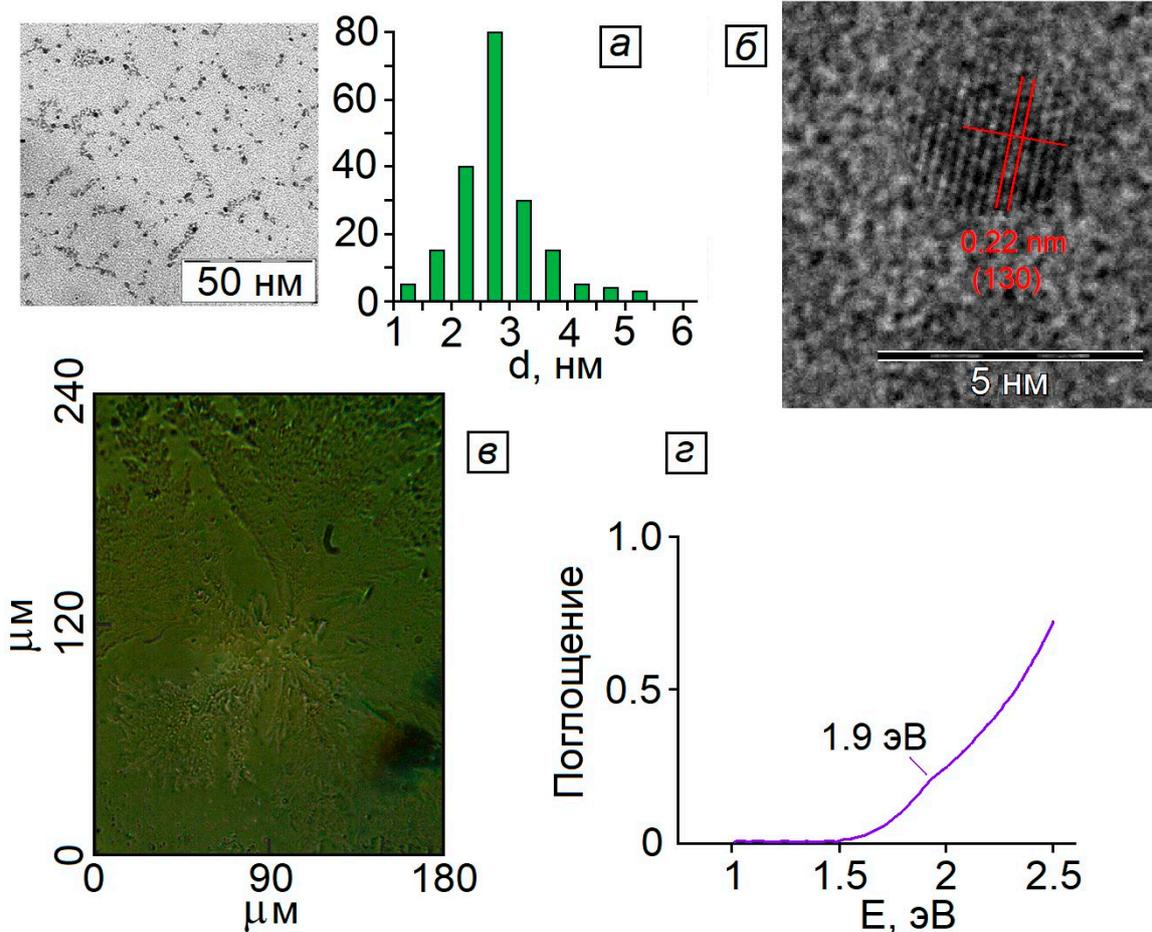


Рис. 1. ПЭМ изображение, гистограмма распределения по размерам КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ (а). ПЭМ высокого разрешения (б). Оптическая фотография плёнки КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ (в). Спектры оптического поглощения КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ (г)

$\Delta E = E_{exc} - E_{mass}$ – величина квантово-размерного эффекта в спектрах поглощения в эрг, $\mu = \frac{m_e \cdot m_h}{m_e + m_h}$,

$m_e = 0.42 \cdot m_0$ и $m_h = 0.81 \cdot m_0$ – эффективная масса электрона и дырки, оценили размер нанокристаллов, который составил 1.9 нм.

3.2. Электрофизические свойства

На рис. 2 представлена логарифмическая зависимость тока от приложенного напряжения при обратном смещении для исследуемых сэндвич-структур Al-KT Ag₂S-ITO. На рис. 3 вольт-амперная характеристика (ВАХ) была несимметрична относительно нулевого поля, что указывает на барьерную структуру. Отметим, что токи при прямом и обратном смещении были одного порядка.

На основе оценки значений работы выхода электронов компонентов исследуемой сэндвич-структуры (4.2–4.8 эВ для ITO [34,35]; 4.1–4.9 эВ – оценочное значение работы выхода для плёнки KT Ag₂S [31, 36], 4.25 эВ – работа выхода электронов для Al [37]) и их соотношения можно ожидать формирование в сэндвич-структуре на границе ITO-плёнка KT Ag₂S омического контакта, а на границе плёнка KTAg₂S-Al барьера Шоттки.

В подтверждение доминирующей роли в формировании проводимости сэндвич-структуры Al-KT Ag₂S-ITO именно барьера Шоттки на контакте KT Ag₂S-Al нами была сформирована также сэндвич-структура Al-KT Ag₂S-Al. Для этой структуры ВАХ также указывала на формирование барьера, причём токи как в одном, так и в

другом направлении были близки, а ВАХ симметрична относительно нулевого поля. Этот факт указывает на то, что проводимость структуры Al-KT Ag₂S-ITO преимущественно определяется именно барьером Шоттки, возникающим на границе Al-KT Ag₂S. Таким образом, на границе раздела плёнка KT Ag₂S-Al образуется выпрямляющий контакт из-за более низкой работы выхода из Al [38, 39]. Поскольку ВАХ исследуемых плёнок проявляют экспоненциальный характер, то, видимо, реализуется механизм проводимости по типу эмиссии Шоттки [40, 41].

Для определения механизма проводимости вольт-амперные характеристики перестраивают в логарифмической шкале [42], что позволяет определить доминирующий механизм проводимости. Экспериментальные зависимости тока от приложенного напряжения (рис. 3) удалось описать в трёх областях степенным законом $I \sim U^m$ [43], где m – показатель степени для каждой области приложенного напряжения. Величина m указывает на кинетику носителей заряда и тип проводимости [42].

Как правило [42], резистивный механизм проводимости наблюдается для наименьшего напряжения, приложенного к исследуемой структуре, когда концентрация инжектированных в плёнку KT носителей заряда значительно меньше концентрации собственных носителей. В таком случае коэффициент m должен равняться, или быть близким к единице. Экспериментально определённая величина m_1 для области напряжений до 0.2 В оказалась равной 0.2.

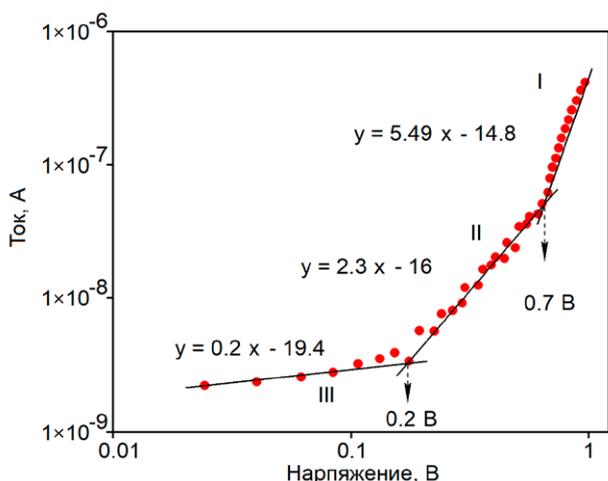


Рис. 2. Логарифмическая зависимость тока от приложенного напряжения при отрицательном смещении при $T = 300$ К для тонкопленочных сэндвич-структур на основе KT Ag₂S/TGA

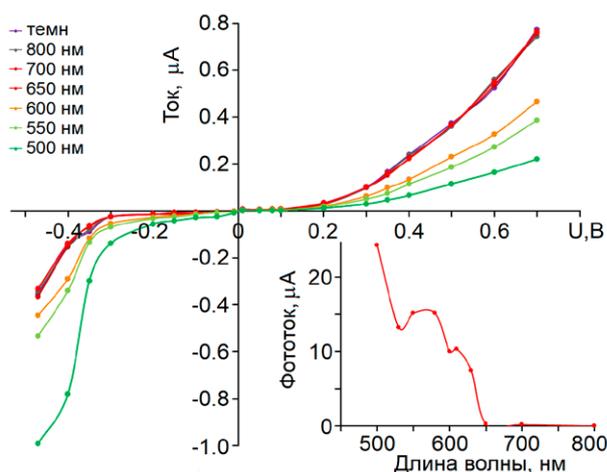


Рис. 3. ВАХ для сэндвич-структур на основе KT Ag₂S/TGA. На врезке спектр фоточувствительности сэндвич-структур на основе KT Ag₂S/TGA

По мере роста напряжения можно также выделить области от 0.2 до 0.7 В, где величина m_2 равна 2.3 и диапазон напряжений больше 0.7 В – m_3 равна 5.49. Область малых напряжений (< 0.2 В) демонстрирует несколько странное поведение, которое, видимо, определяется неоднородной структурой плёнки КТ Ag_2S и вкладом в проводимость нескольких процессов. Детализации этих процессов будет посвящена отдельная работа.

В диапазоне приложенных напряжений от 0.2 до 0.7 В наблюдается токовый режим с ограниченным пространственным зарядом (space charge limited conduction (SCLC)) [44]. Третий диапазон соответствует переносу заряда за счет механизма ловушки с ограниченной проводимостью (trap charge limited conduction (TCLC)) [45]. В формировании этого третьего участка ВАХ, по видимому, участвуют локализованные состояния центров рекомбинационной люминесценции (рис. 1). Кроме того, заметную роль также могут играть более мелкие локализованные состояния, обнаруженные нами ранее для аналогичных образцов коллоидных КТ Ag_2S методом термостимулированной люминесценции [46].

3.3. Фотоэлектрический отклик

На рис. 3. представлены ВАХ для сэндвич-структур Al-КТ Ag_2S -ITO как в отсутствие излучения, так и при освещении плёночной структуры монохроматическим излучением. Видно, что для длины волны оптического излучения больше, чем 700 нм (1.77 эВ) изменения для отрицательной ветви ВАХ отсутствуют. Сопоставление со спектрами оптического поглощения плёнок КТ Ag_2S , для которых наблюдается пик экситонного поглощения в области 1.9 эВ (650 нм), а длинноволновый край поглощения как раз около 700 нм, позволяет утверждать, что первичным актом в формировании фотоотклика сэндвич-структур на основе КТ Ag_2S /TGA является поглощение света конденсатами КТ Ag_2S . Форма спектра фототока, измеренного для отрицательного смещения – 0.2 В, повторяет длинноволновый край спектра поглощения плёнки КТ Ag_2S /TGA. Прямая ветвь ВАХ демонстрирует изменения под действием излучения с длиной волны меньше 700 нм, что также подтверждает доминирующую роль в формировании фотоотклика процесса поглощения в плёнке КТ Ag_2S /TGA.

4. Заключение

В результате исследования электрофизических и свойств сэндвич-структуры Al-КТ Ag_2S -ITO, в которой основным рабочим компонентом

является конденсат коллоидных КТ Ag_2S , пассивированных молекулами тиогликолевой кислоты (TGA), установлены новые закономерности, указывающие на формирование фоточувствительных систем с барьером Шоттки. Полученные экспериментальные данные показали, что проводимость подобных структур определяется барьером Шоттки на границе Al-КТ Ag_2S . Спектральная область фоточувствительности таких структур совпадает с областью поглощения конденсатов КТ Ag_2S . Полученные результаты указывают на возможность разработки модельных объектов для фотодиодных структур на основе конденсатов коллоидных КТ Ag_2S /TGA.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

- Alharthi S. S., Alzahrani A., Razvi M. A. N., Badawi A., Althobaiti M. G. Spectroscopic and electrical properties of Ag_2S /PVA nanocomposite films for visible-light optoelectronic devices. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 2020;30: 3878–3885. <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01519-4>
- Chand S., Sharma E., Sharma P. Phase change induced quantization in NIR emitting Ag_2S nanocrystals: Structural and optical response for solar energy applications. *Journal of Alloys and Compounds V*. 2019;770: 1173–1180. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.133>
- Cotta M. A. Quantum dots and their applications: what lies ahead? *ACS Applied Nano Materials*. 2020;3(6): 4920–4924. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c01386>
- Lei Y., Xu S., Ding M., Li L., Sun Q., Wang Z. L. Enhanced photocatalysis by synergistic piezotronic effect and exciton–plasmon interaction based on (Ag- Ag_2S)/ $BaTiO_3$ heterostructures. *Advanced Functional Materials*. 2020;30(51): 2005716. <https://doi.org/10.1002/adfm.202005716>
- Gao H., Wang F., Wang S., Wang X., Yi Z., Yang H. Photocatalytic activity tuning in a novel Ag_2S /CQDs/ $CuBi_2O_4$ composite: Synthesis and photocatalytic mechanism. *Materials Research Bulletin*. 2019;115: 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2019.03.021>

6. Tretyakov I., Svyatodukh S., Perepelitsa A., ... Goltsman G. Ag₂S QDs/Si Heterostructure-Based Ultrasensitive SWIR Range Detector. *Nanomaterials*. 2020;10(5):861. <https://doi.org/10.3390/nano10050861>
7. Smirnov M. S., Ovchinnikov O. V. IR luminescence mechanism in colloidal Ag₂S quantum dots. *Journal of Luminescence*. 2020; 227: 117526. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117526>
8. Mir W. J., Swarnkar A., Sharma R., Katti A., Adarsh K. V., Nag A. Origin of unusual excitonic absorption and emission from colloidal Ag₂S nanocrystals: ultrafast photophysics and solar cell. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2015;6: 3915–3922. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.5b01692>
9. Ruiz D., del Rosal B., Acebron M., ... Juarez B. H. Ag/Ag₂S Nanocrystals for high Sensitivity near-infrared luminescence nanothermometry. *Advanced Functional Materials*. 2016;27: 1604629. <https://doi.org/10.1002/adfm.201604629>
10. Zamiri R., Abbastabar Ahangar H., Zakaria A., Zamiri G., Shabani M., Singh B., Ferreira J. M. F. The structural and optical constants of Ag₂S semiconductor nanostructure in the Far-Infrared. *Chemistry Central Journal*. 2015;9(1): 1–6. <https://doi.org/10.1186/s13065-015-0099-y>
11. Lesnyak V., Gaponik N., Eychmüller A. Colloidal semiconductor nanocrystals: the aqueous approach. *Chemical Society Reviews*. 2013;42: 2905–2929. <https://doi.org/10.1039/c2cs35285k>
12. Gilmore R. H., Liu Y., Shcherbakov-Wu W., ... Tisdale W. A. Epitaxial dimers and Auger-assisted detrapping in PbS quantum dot. *Solids Matter*. 2019;1: 250–265. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.05.015>
13. Zhang Y., Xia J., Li C., ... Li Q. Near-infrared-emitting colloidal Ag₂S quantum dots excited by an 808 nm diode laser. *Journal of Materials Science*. 2017;52(16): 9424–9429. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1131-5>
14. Kondratenko T. S., Zvyagin A. I., Smirnov M. S., Grevtseva I. G., Perepelitsa A. S., Ovchinnikov O. V. Luminescence and nonlinear optical properties of colloidal Ag₂S quantum dots. *Journal of Luminescence*. 2019;208: 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.12.042>
15. Wu Q., Zhou M., Shi J., Li Q., Yang M., Zhang Z. Synthesis of water-soluble Ag₂S Quantum dots with fluorescence in the second Near-Infrared window for turn-on detection of Zn(II) and Cd(II). *Analytical Chemistry*. 2017;89(12): 6616–6623. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b00777>
16. Ovchinnikov O. V., Grevtseva I. G., Smirnov M. S., ... Matsukovich A.S. Effect of thioglycolic acid molecules on luminescence properties of Ag₂S quantum dots. *Optical and Quantum Electronics*. 2020;52: 198–1-23. <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02314-8>
17. Kondratenko T., Ovchinnikov O., Grevtseva I., ... Tatianina E. Thioglycolic acid FTIR spectra on Ag₂S quantum dots interfaces. *Materials*. 2020;13: 909–1-15. <https://doi.org/10.3390/ma13040909>
18. Vardara D. O., Aydin S., Hocaoglu I., Acar F. H. Y., Basaran N. Effects of silver sulfide quantum dots coated with 2-mercaptopropionic acid on genotoxic and apoptotic pathways in vitro. *Chemico-Biological Interactions*. 2018;291: 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2018.06.032>
19. Jiang P., Wang R., Chen Z. Thiol-based non-injection synthesis of near-infrared Ag₂S/ZnS core/shell quantum dots. *RSC Advances*. 2015;5: 56789–56793. <https://doi.org/10.1039/C5RA08008H>
20. Duman F. D. , Erkisa M., Khodadust R., Ari F., Ulukaya E., Acar H. Y. Folic acid-conjugated cationic Ag₂S quantum dots for optical imaging and selective doxorubicin delivery to HeLa cells. *Nanomedicine (Lond)*. 2017;12(19): 2319–2333. <https://doi.org/10.2217/nnm-2017-0180>
21. Liu Q., Pu Y., Zhao Z., Wang J., Wang D. Synthesis of silver sulfide quantum dots via the liquid–liquid interface reaction in a rotating packed bed reactor. *Transactions of Tianjin University*. 2020;26: 273–282. <https://doi.org/10.1007/s12209-019-00228-5>
22. Ovchinnikov O. V., Aslanov S. V., Smirnov M. S., Grevtseva I. G., Perepelitsa A. S. Photostimulated control of luminescence quantum yield for colloidal Ag₂S/2-MPA quantum dots. *RSC Advances*. 2019;9: 37312–37320. <https://doi.org/10.1039/C9RA07047H>
23. Borovaya M., Horiunova I., Plokhovska S., Pushkarova N., Blume Y., Yemets A. Synthesis, properties and bioimaging applications of silver-based quantum dots. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22: 12202 (1-23). <https://doi.org/10.3390/ijms222212202>
24. Tang R., Xu B., Shen D., Sudlow G., Achilefu S. Ultrasmall visible-to-near-infrared emitting silver-sulfide quantum dots for cancer detection and imaging. *ACS Nano*. 2015;9(1): 220–230. <https://doi.org/10.1021/nn5071183>
25. Ding C., Huang Y., Shen Z., Chen X. Synthesis and bioapplications of Ag₂S quantum dots with Near-Infrared fluorescence. *Advanced Materials*. 2021;33: 2007768. <https://doi.org/10.1002/adma.202007768>
26. Ovchinnikov O., Aslanov S., ... Grevtseva I. Colloidal Ag₂S/SiO₂ core/shell quantum dots with IR luminescence. *Optical Materials Express*. 2021;11(1): 89–104. <https://doi.org/10.1364/OME.411432>
27. Kang M. H., Kim S. H., Jang S., ... Park J. K. Synthesis of silver sulfide nanoparticles and their photodetector applications. *RSC Advances*. 2018;8(50): 28447–28452. <https://doi.org/10.1039/C8RA03306D>

28. Feng J., Li X., Shi Z., ... Zhu L. 2D ductile transition metal chalcogenides (TMCs): novel high-performance Ag_2S nanosheets for ultrafast photonics. *Advanced Optical Materials*. 2019;8(6): 1901762. <https://doi.org/10.1002/adom.201901762>
29. Badali Y., Azizian-Kalandaragh Y., Akhlaghi E. A., Altindal S. Ultrasound-assisted method for preparation of Ag_2S nanostructures: fabrication of Au/ Ag_2S -PVA/n-Si Schottky barrier diode and exploring their electrical properties. *Journal of Electronic Materials*. 2020;49(1): 444–453. <https://doi.org/10.1007/S11664-019-07708-3>
30. Гусев А. Н., Мазинов А. С., Шевченко А. И., Тютюник А. С., Гурченко В. С., Брага Е. В. Исследование гетеропереходов на основе системы фуллерена и гидразона. *Прикладная физика*. 2019;6: 48–53. режим доступа: <https://applphys.orion-ir.ru/appl-19/19-6/PF-19-6-48.pdf>
31. Lin S., Feng Y., Wen X. et. al. Theoretical and experimental investigation of the electronic structure and quantum confinement of wet-chemistry synthesized Ag_2S nanocrystals. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2015;119(1): 867–872. <https://doi.org/10.1021/jp511054g>
32. Kayanuma Y. Quantum-size effects of interacting electrons and hHoles in semiconductor microcrystals with spherical shape. *Physical Review B*. 1988;38(14): 9797–9805. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.38.9797>
33. Lu X., Li L., Zhang W., Wang C. Preparation and characterization of Ag_2S nanoparticles embedded in polymer fibre matrices by electrospinning. *Nanotechnology*. 2005;16(10): 2233–2237. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/10/043>
34. Sugiyama K., Ishii H., Ouchi Y., Seki K. Dependence of indium–tin–oxide work function on surface cleaning method as studied by ultraviolet and x-ray photoemission spectroscopies. *Journal of Applied Physics*. 2000;87(1): 295–298. <https://doi.org/10.1063/1.371859>
35. Kim S. Y., Lee J.-L., Kim K.-B., Tak Y.-H. Effect of ultraviolet–ozone treatment of indium–tin–oxide on electrical properties of organic light emitting diodes. *Journal of Applied Physics*. 2004;95(5): 2560–2563. <https://doi.org/10.1063/1.1635995>
36. Tubtimtae A., Cheng K.-Y., Lee M.-W. Ag_2S quantum dot-sensitized WO_3 photoelectrodes for solar cells. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2014;18: 1627–1633. <https://doi.org/10.1007/s10008-014-2385-3>
37. Lide D. R., Weast R. C. *CRC handbook of Chemistry and physics*. CRC Press, Boca Raton, FL, 1986.
38. Chen H., Lei Y., Yang X., Zhao C., Zheng Z. Using a CdS under-layer to suppress charge carrier recombination at the $\text{Ag}_2\text{S}/\text{FTO}$ interface. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;879: 160348. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160348>
39. Тютюник А. С., Гурченко В. С., Мазинов А. С. Исследование температурных зависимостей вольт-амперных характеристик гибридных органических материалов на основе цинковых комплексов. *Прикладная физика*. 2021;5: 81–87. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-5-81-87>
40. Lengyel G. Schottky emission and conduction in some organic insulating materials. *Journal of Applied Physics*. 1966;37(2): 807–810. <https://doi.org/10.1063/1.1708261>
41. Matsumura M., Jinde Y., Akai T., Kimura T. Analysis of current-voltage characteristics of organic electroluminescent devices on the basis of Schottky emission mechanism. *Japanese Journal of Applied Physics*. 1996;35(11): 5735–5739. <https://doi.org/10.1143/jjap.35.5735>
42. Zhu Y. B., Geng K., Cheng Z. S., Yao R. H. Space-charge-limited current injection into free space and trap-filled solid. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2021;49(7): 2107–2112. <https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3084461>
43. Gupta R. K., Ghosh K., Kahol P. K. Fabrication and electrical characterization of Au/p-Si/STO/Au contact. *Current Applied Physics*. 2009;9(5): 933–936. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2008.09.007>
44. Dhifaoui H., Aloui W., Bouazizi A. Optical, electrochemical and electrical properties of p-N,N-dimethyl-amino-benzylidene-malononitrile thin films. *Materials Research Express*. 2020;7(4): 045101. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab7dfb>
45. Gusev A., Braga E., Tyutyunik A., ... Linert W. Synthesis, photoluminescence and electrical study of pyrazolone-based azomethine ligand Zn(II) complexes. *Materials*. 2020;13(24): 5698–1–12. <https://doi.org/10.3390/ma13245698>
46. Perepelitsa A. S., Smirnov M. S., Ovchinnikov O. V., Latyshev A. N., Kotko A. S. Thermally stimulated luminescence of colloidal Ag_2S quantum dots. *Journal of Luminescence*. 2018;198: 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.02.009>

Информация об авторах

Гурченко Владимир Сергеевич, аспирант кафедры радиофизики и электроники, Физико-технический институт, Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского (Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-8270-3820>
gurchenko_v@mail.ru

Мазинов Алим Сеит-Аметович, д. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой радиофизики и электроники, Физико-технический институт, Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского (Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-0834-2390>
mazinovas@cfuv.ru

Смирнов Михаил Сергеевич, д. ф.-м. н., доцент кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8765-0986>

smirnov_m_s@mail.ru

Гревцева Ирина Геннадьевна, к. ф.-м. н., старший преподаватель кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-1964-1233>

grevtseva_ig@inbox.ru

Нестеренко Лолита Павловна, к. ф.-м. н., доцент кафедры экспериментальной физики, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

lolita122@mail.ru

Овчинников Олег Владимирович, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-6032-9295>

ovchinnikov_o_v@rambler.ru

Поступила в редакцию 08.11.2022; одобрена после рецензирования 22.11.2022; принята к публикации 25.11.2022; опубликована онлайн 25.06.2023.