

УДК 621.
EDN: GETOGH

PACS: 85, 85.60.–q

Неохлаждаемый матричный фотосенсор 640×512 с расширенной областью чувствительности 0,4–2,0 мкм на основе коллоидных квантовых точек ККТ PbS со слоем из $p\text{-NiO}_x$, блокирующим электроны

© В. П. Пономаренко^{1,2}, В. С. Попов^{1,2,*}, М. А. Панков¹, К. А. Хамидуллин¹,
А. Д. Деомидов¹, А. А. Федоров¹, Г. Ю. Деев¹, Д. Э. Драгунов¹, О. В. Епифанов¹,
Ш. И. Зарипов¹, П. С. Лазарев¹, Е. В. Мирофьянченко¹, Д. В. Ильинов¹, В. А. Петрушина¹,
И. Д. Бурлаков¹, А. В. Полесский¹, В. В. Старцев¹, С. Б. Бричкин^{2,3}, М. Г. Спиринов^{2,3},
С. А. Товстун^{2,3}, М. В. Гапанович^{2,3}, В. Ю. Гак^{2,3}, А. В. Гадомская^{2,3}, Д. Н. Певцов²,
А. В. Кацаба², А. С. Кириченко², Д. В. Демкин², В. А. Иванова², В. В. Иванов²,
В. Ф. Разумов^{2,3}

¹ АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: popov.vs@tipt.ru

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия³ Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
Московская обл., г. Черноголовка, 142432 Россия

Статья поступила в редакцию 3.03.2025; после доработки 25.03.2025; принята к публикации 7.04.2025

Шифр научной специальности: 1.3.11

Приборы ночного видения с расширенной областью чувствительности от 0,4 мкм до 2,0 мкм имеют важнейшее значение для научных, гражданских и специальных применений. Приведены архитектура и основные характеристики матричного фотосенсора формата 640×512 (шаг 15 мкм) с расширенной областью чувствительности (0,4–2,0 мкм), разработанного на основе коллоидных квантовых точек ККТ PbS. Основная часть фототока генерируется в слое ККТ $n\text{-PbS-TBAI}$. Этот слой изготовлен путем замены исходного лиганда (олеиновая кислота) на йод при обработке слоя ККТ иодидом тетра- n -бутиламмония (ТВАИ). Слой, блокирующий электроны (транспортный слой для дырок), создавался на основе $p\text{-NiO}_x$. Слой, блокирующий дырки (транспортный слой для электронов), изготавливался на основе $n\text{-ZnO}$.

Ключевые слова: коллоидная квантовая точка (ККТ); лиганд; транспортный слой; фотосенсор.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-2-12-20

1. Введение

Отличительной чертой последнего времени является стремительный рост исследований, направленных на создание матричных фотоприемных устройств (МФПУ) с применением материалов и структур ограниченной размерности [1–3]. В последние два десятилетия отчетливо проявилась новая тенденция в области создания фотосенсоров, связанная с применением так называемых квазинульмер-

ных коллоидных квантовых точек (ККТ), спектральные свойства которых задаются средним размером наночастиц полупроводника, изменяемого в пределах 2–10 нм. Развитие этого направления привело к созданию в 2020 году первых серийных матриц и камер на их основе, работающих в спектральном диапазоне от 0,4 до 2,1 мкм [3].

Использование коллоидных квантовых точек позволяет существенно упростить технологию, снизить ограничения предельного

шага фоточувствительных элементов [4] и значительно снизить стоимость МФПУ [5].

Технология изготовления матричных фотосенсоров с использованием ККТ, получившая название монолитно-гибридной [4, 6], основана на непосредственном нанесении жидких суспензий, содержащих фоточувствительные наночастицы, на поверхность кремниевой СБИС считывания и предварительной обработки фотосигналов без применения микроконтактов из индия или иных материалов. Такие фотосенсоры используют фронтальную засветку, что отличает их от сенсоров на основе эпитаксиальных 3D материалов, например $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$. В последних излучение от объектов наблюдаемой сцены перед поглощением фоточувствительным слоем ($\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$) должно проходить через широкозонную монокристаллическую подложку (InP) эпитаксиального слоя, непрозрачную для видимой области (0,4–0,76 мкм), что ограничивает область спектральной чувствительности фотосенсора интервалом длин волн 0,9–1,6 мкм. Возможность использования фронтальной засветки фоточувствительного слоя без применения специальных технологических операций утоньшения подложек [7, 8], сильно усложняющих технологию изготовления приборов, обеспечивает широкоспектральность МФПУ на основе ККТ. Например, применение ККТ из PbS с размерами коллоидных квантовых точек порядка

10 нм для изготовления фоточувствительного слоя матрицы обеспечивает возможность регистрации электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне от 0,4 до 2,1 мкм [3].

В работе [9] был описан разработанный нами неохлаждаемый матричный фотосенсор 640×512 (шаг 15 мкм) для области спектра 0,4–2,0 мкм на основе коллоидных квантовых точек ККТ PbS, где транспортный слой для дырок, блокирующий электроны, был изготовлен из ККТ $p\text{-PbS-EDT}$ (рис. 1а).

В настоящей работе описано разработанное нами новое матричное фотоприемное устройство (МФПУ) для области спектра 0,4–2,0 мкм формата 640×512 с шагом фоточувствительных элементов 15 мкм, изготовленное из коллоидных квантовых точек ККТ PbS на поверхности кремниевой СБИС считывания фотосигналов p -канального типа, где в отличие от работы [9], слой, блокирующий электроны (транспортный слой для дырок), создан не из жидкой суспензии ККТ $p\text{-PbS-EDT}$, а из материала $p\text{-NiO}_x$, изготовленного магнетронным напылением. Этот материал недавно начал применяться при создании солнечных элементов в качестве дырочного транспортного слоя и хорошо зарекомендовал себя, благодаря более высоким по сравнению с органическими материалами подвижности и стабильности свойств [10, 11]. Остальные слои были изготовлены так же, как в работе [9].

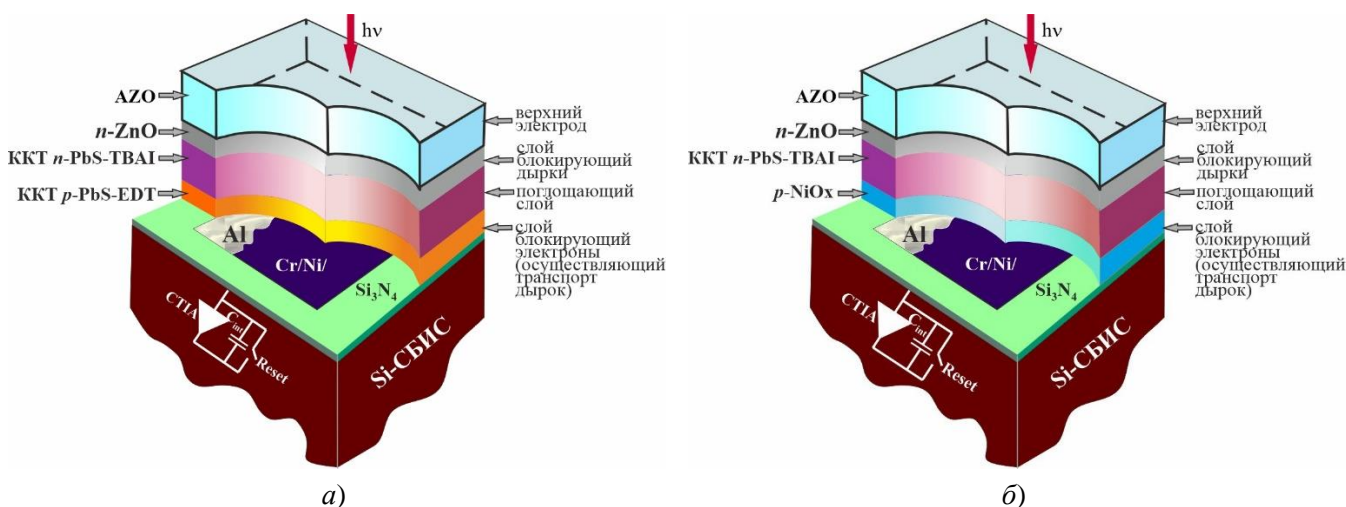


Рис. 1. Архитектуры МФПУ 640×512 (шаг 15 мкм) на основе ККТ PbS: а) – чувствительный элемент МФПУ со слоем, блокирующим электроны (транспортным слоем для дырок) из ККТ $p\text{-PbS-EDT}$ [9]; б) – чувствительный элемент МФПУ со слоем, блокирующим электроны (транспортным слоем для дырок) из материала $p\text{-NiO}_x$

2. Архитектура матричного фотосенсора 640×512 со слоем, блокирующим электроны и осуществляющим транспорт дырок на основе $p\text{-NiO}_x$

Архитектура каждого фоточувствительного элемента, разработанного авторами нового матричного фотосенсора 640×512, имеет вид $\text{Cr}/\text{Ni}/p\text{-NiO}_x/\text{ККТ } n\text{-PbS-TBAI}/n\text{-ZnO}/\text{AZO}$ (рис. 1б). Основная доля фотоносителей генерируется излучением в слое ККТ $n\text{-PbS-TBAI}$. После распада фотоэкситонов образовавшиеся электроны и дырки разделяются энергетическим барьером типа $p\text{-}n$ -перехода на контакте слоев ККТ $n\text{-PbS-TBAI}$ и $p\text{-NiO}_x$. Изготовление слоя ККТ PbS электронного типа проводимости проводится путем замены исходного

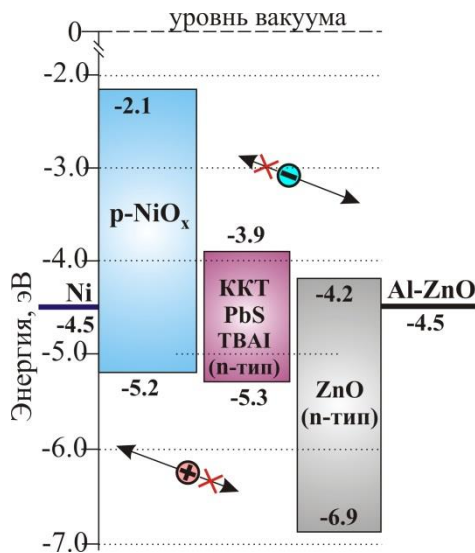


Рис. 2а. Энергетическое строение слоев структуры $\text{Cr}/\text{Ni}/p\text{-NiO}_x/\text{ККТ } n\text{-PbS-TBAI}/n\text{-ZnO}/\text{AZO}$, на основе которой разработан матричный фотосенсор 640×512 из ККТ PbS со слоем на основе $p\text{-NiO}_x$, блокирующим электроны и являющимся транспортным для дырок

3. Свойства матричного фотосенсора 640×512 со слоем блокирующим электроны на основе $p\text{-NiO}_x$

Фотография изготовленного матричного фоточувствительного элемента формата 640×512 на основе коллоидных квантовых точек ККТ PbS с кремниевой СБИС считывания и предварительной обработки фотосигналов и верхним электродом из $\text{Al}:\text{ZnO}$ (AZO), смон-

лиганда (олеиновая кислота) после обработки йодидом тетра- n -бутиламмония. В качестве прекурсоров свинца и серы при синтезе ККТ PbS применяются хлорид свинца и N,N' -дифенилтиомочевина. В качестве прозрачного для излучения электрода, использовано покрытие из оксида цинка, допированного алюминием, с образованием твердого раствора в системе $\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3$ (AZO) [12].

Энергетическое строение отдельных слоев структуры, демонстрирующее направления транспорта электронов и дырок в слоях фотосенсора с архитектурой $\text{Cr}/\text{Ni}/p\text{-NiO}_x/\text{ККТ } n\text{-PbS-TBAI}/n\text{-ZnO}/\text{AZO}$, показано на рис. 2а вместе с аналогичным энергетическим строением слоев структуры $\text{Cr}/\text{Ni}/\text{ККТ } p\text{-PbS-EDT}/\text{ККТ } n\text{-PbS-TBAI}/n\text{-ZnO}/\text{AZO}$, показанным на рис. 2б.

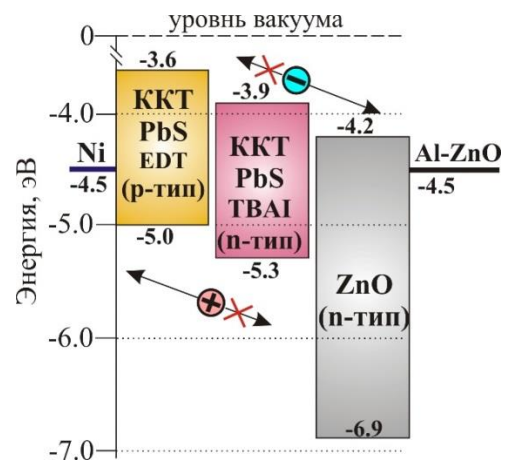


Рис. 2б. Энергетическое строение слоев структуры $\text{Cr}/\text{Ni}/\text{ККТ } p\text{-PbS-EDT}/\text{ККТ } n\text{-PbS-TBAI}/n\text{-ZnO}/\text{AZO}$, на основе которой разработан матричный фотосенсор 640×512 из ККТ PbS со слоем на основе ККТ PbS ($p\text{-EDT}$) [9], блокирующим электроны и являющимся транспортным для дырок

тированного на растре для исследований, показана на рисунке 3а.

Исследование спектральной зависимости оптического поглощения суспензии коллоидных квантовых точек сульфида свинца в растворе n -октана, синтезированных вышеописанным способом с использованием PbCl_2 в качестве прекурсора свинца, показало наличие первого экситонного пика с максимумом, расположенным на длине волны $\lambda_{\text{max}} \approx 1,8$ мкм.

При этом, его ширина на полувысоте (FWHM) составила величину 220 нм, что свидетельствует о достаточно высокой монодисперсности нанокристаллов PbS [13] в поглощающем слое ККТ PbS (*n*-ТВАИ), изготовленного матричного фотосенсора. На рисунке 3б показана приведенная к единице спектральная зависимость фоточувствительности $S_i(\lambda)/S_i(\lambda_{\max})$ матричного фотосенсора 640×512 с кремниевой СБИС считывания и предварительной обработки фотосигналов. Длинноволновая граница фоточувствительности составляет $\lambda_{\text{гр}} = 1,96$ мкм, ширина полосы чувствительности укладывается в интервал длин волн $\Delta\lambda = 0,4 \div 2,0$ мкм. Использование эмпирического соотношения $E_0 = 0,41 + (0,025d^2 + 0,283d)^{-1}$, устанавливающего связь между энергией оп-

тических переходов E_0 в спектрах оптического поглощения раствора ККТ и диаметром d наночастиц, полученного в работе [13], показало, что диаметр используемых нами коллоидных квантовых точек составляет величину $d \approx 9,5\text{--}10$ нм. Исследование формы наночастиц, проведенное методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, показало, что преобладающей формой ККТ является форма усеченного октаэдра (рис. 4а). Каждая коллоидная квантовая точка имеет восемь граней (111) и шесть граней (100), что подтверждается результатами исследования, проведенного в работе [14]. Строение граней (100) и (111) показано на рис. 4б. Фотография ККТ, полученная с помощью просвечивающей микроскопии, представлена на рис. 4в.

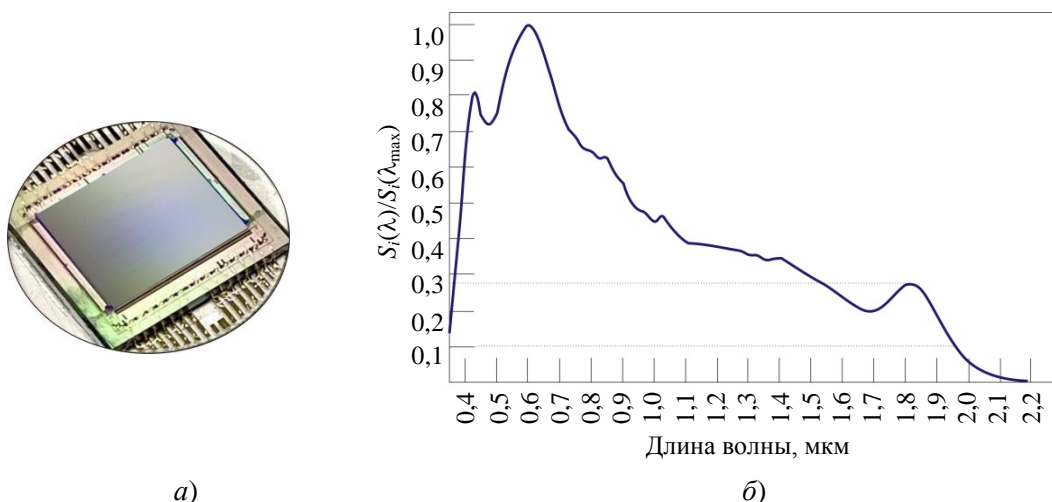


Рис. 3. Матричный фоточувствительный элемент формата 640×512 на основе коллоидных квантовых точек ККТ PbS с архитектурой Cr/Ni/p-NiO_x/ККТ n-PbS-ТВАИ/n-ZnO/AZO с кремниевой СБИС считывания и предварительной обработки фотосигналов: а) – фотография ФЧЭ на растре; б) – приведенная к единице спектральная зависимость фоточувствительности при комнатной температуре

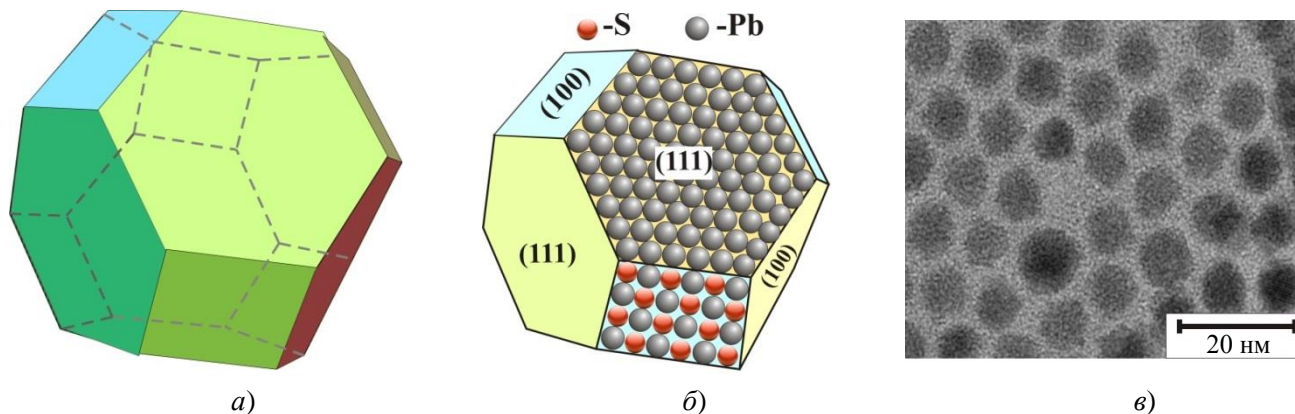


Рис. 4. а) – модель формы ККТ (усеченный октаэдр); б) – строение граней (100) и (111) нанокристалла ККТ; в) – фотография ККТ, полученная с помощью ПЭМ

Вольт-амперная характеристика одного из фоточувствительных элементов, измеренная при комнатной температуре в режиме отсутствия освещения и при освещении от монохроматического источника с длиной волны $\lambda = 0,94$ мкм и мощностью $P = 0,072$ Вт·см⁻², показана на рисунке 5. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) имеют вид, характерный для структур с энергетическим барьером типа $p-n$ -перехода. Монохроматическая амперваттная чувствительность при нулевом смещении составляет $S_0 = 0,35$ А/Вт и увеличивается до значения $S_{-1} = 7,4$ А/Вт при обратном смещении, равном $V_{см} = -1,0$ В. Среднее значение S_0 , полученное усреднением амперваттной чувствительности по 7 фоточувствительным элементам, составляет 0,27 А/Вт.

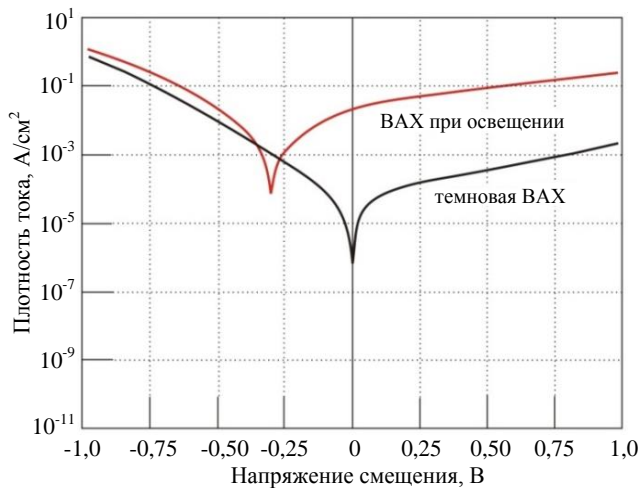


Рис. 5. ВАХ фоточувствительного элемента при за­светке от монохроматического источника ($\lambda = 0,94$ мкм, $P = 0,072$ Вт·см⁻²) и в отсутствии освещения

Спектральная зависимость удельной обнаружительной способности неохлаждаемого одноэлементного фотосенсора с архитектурой Cr/Ni/p-NiO_x/KKT n -PbS-TBAI/n-ZnO/AZO, измеренная при освещении от АЧТ с температурой $T_{АЧТ} = 1273$ К при напряжении смещения $V_{см}$, равном 3,0 В, показана на рисунке 6.

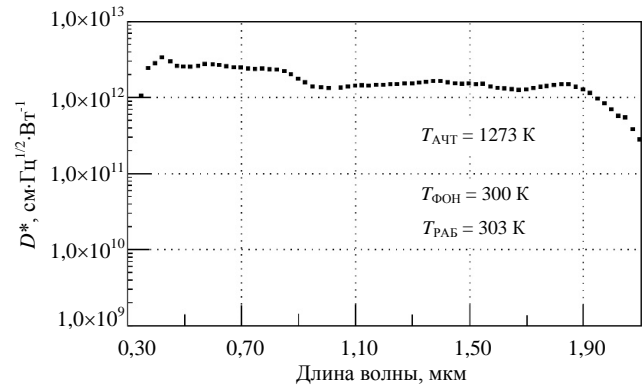


Рис. 6. Спектральная зависимость удельной обнару­жительной способности неохлаждаемого одноэле­ментного фотосенсора с архитектурой Cr/Ni/p-NiO_x/KKT n -PbS-TBAI/n-ZnO/AZO, измеренная при освещении от АЧТ с температурой $T_{АЧТ} = 1273$ К ($V_{см} = 3,0$ В)

На рисунке 7 представлены фрагменты изображений транспортного узла, руки с паяльником и человеческого лица, полученные в дневное время при освещенности наблюдаемой сцены 300–500 лк с применением матричного фотосенсора 640×512 (шаг 15 мкм). Использовалась одноточечная коррекция и калибровка сигнала по расфокусированному изображению.

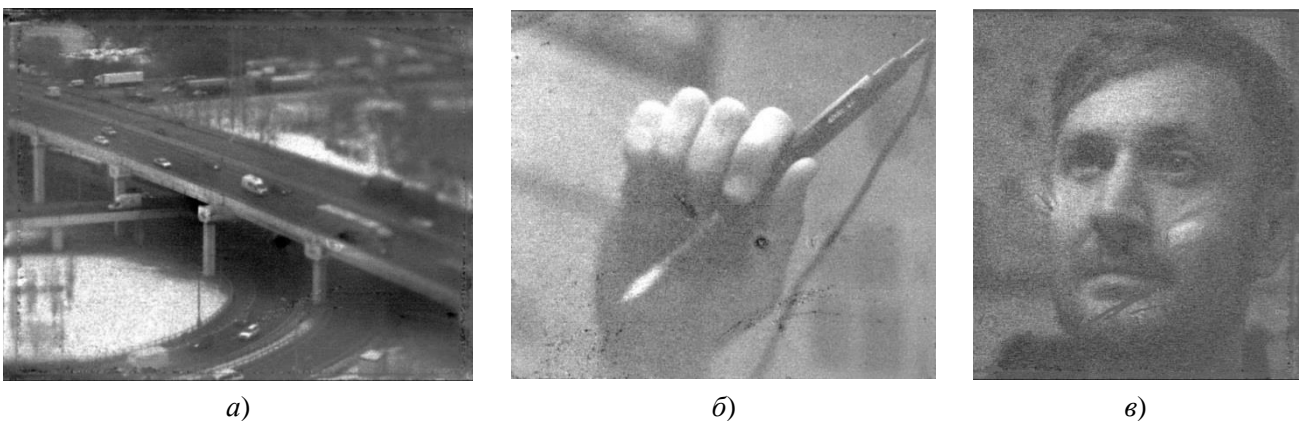


Рис. 7. Фрагменты изображений, полученные с применением неохлаждаемого матричного фотосенсора 640×512 (шаг 15 мкм) на основе коллоидных квантовых точек из PbS для области спектра 0,4–2,0 мкм; а) – транспортный узел (500 лк); б) – рука с паяльником (300 лк, $T_{паяльника} = 300-350$ °С); изображение человеческого лица (300 лк); в скобках указана освещенность сцены во время съемки

4. Заключение

Описанный в настоящей работе матричный фотосенсор 640×512 на основе коллоидных квантовых точек из PbS обладает областью фоточувствительности $0,4\text{--}2,0$ мкм, расширенной по сравнению с приборами на основе твердого раствора $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$. Анализ использования такой расширенной области фоточувствительности в приборах ночного видения, проведенный в работе [15], показал:

а) средняя величина естественной ночной освещенности в отсутствие Луны в области длин волн $\lambda = 0,6\text{--}0,8$ мкм составляет $(1,5\text{--}3,0) \times 10^{-5}$ Вт/м²·мкм, а в области длин волн $1,4\text{--}1,8$ мкм она возрастает до $(6,0\text{--}7,0) \times 10^{-4}$ Вт/м²·мкм (рис. 8);

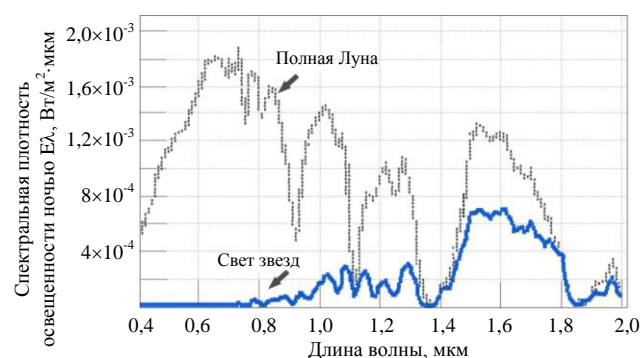


Рис. 8. Спектральная плотность ночной освещенности при наличии полной Луны [16]

б) прозрачность атмосферы в ближней ИК-области заметно выше, чем в видимой. Так, при метеорологической видимости $S_M = 10$ км пропускание слоя атмосферы толщиной 1 км на длине волны $\lambda = 0,6$ мкм составляет величину 0,72, а в центре окна прозрачности $1,4\text{--}1,8$ мкм она возрастает до 0,93;

в) яркость атмосферной дымки уменьшается более, чем в 10 раз в области длин волн $1,4\text{--}1,8$ мкм по сравнению с видимой областью;

г) уровень естественной ночной освещенности в области спектра $0,4\text{--}0,9$ мкм в течение ночи меняется от 10^{-1} Вт/м² до $2,5 \times 10^{-5}$ Вт/м² (т. е. практически на 4 порядка), а в области спектра $1,4\text{--}1,8$ мкм это изменение лежит в пределах от $1,6 \times 10^{-1}$ Вт/м² до $(3\text{--}4) \times 10^{-3}$ Вт/м²;

д) величина контраста (объект наблюдения/фон) в области длин волн $1,4\text{--}1,8$ мкм в $1,4\text{--}1,5$ раз выше, чем в области $0,4\text{--}0,9$ мкм.

Это свидетельствует о перспективности использования описанных в работе матричных фотосенсоров с расширенной областью чувствительности $0,4\text{--}2,0$ мкм для создания отечественных приборов ночного видения с улучшенными характеристиками.

Работа выполнена при поддержке Фонда перспективных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В. С., Пономаренко В. П. Новая фотосенсорика: 0D vs 2D. – М.: МФТИ, Физтех, 2024.
2. Пономаренко В. П., Попов В. С., Шуклов И. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф. / Успехи химии. 2024. Т. 93. № 4. С. RCR5113. <https://doi.org/10.59761/RCR5113>.
3. Hinds S., Klem E., Gregory C., Hilton A., Hames G., Violette K. / Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11407. <https://doi.org/10.1117/12.2559115>.
4. Malinowski P. E., Georgitzikis E., Maes J., Vamvaka I., Frazzica F., Van Olmen J., De Moor P., Heremans P., Hens Z., Cheyns D. / Sensors. 2017. Vol. 17. P. 2867. <https://doi.org/10.3390/s17122867>.
5. Gréboval C., Darson D., Parahyba V., Alchaar R., Abadie C., Noguier V., Ferré S., Izquierdo E., Khalili A., Prado Y., Potet P., Lhuillier E. / Nanoscale. 2022. Vol. 14. № 26. P. 9359–9368. <https://doi.org/10.1039/D2NR01313D>.
6. Попов В. С., Пономаренко В. П., Попов С. В. / Прикладная физика. 2023. № 6. С. 45. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2023-6-45-53>.
7. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. / Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131–162.
8. Martin T., Dixon P., Gagliardi M.-A., Masaun N. / Proc. of SPIE. 2005. Vol. 5726. P. 85–91. <https://doi.org/10.1117/12.596409>.
9. Пономаренко В. П., Попов В. С., Панков М. А., Хамидуллин К. А., Деомидов А. Д., Федоров А. А., Девев Г. Ю., Драгунов Д. Э., Елифанов О. В., Лазарев П. С., Мирофанченко Е. В., Ильинов Д. В., Петрушина В. А., Бурлаков И. Д., Полесский А. В., Старцев В. В., Бречкин С. Б., Спиринов М. Г., Товстун С. А., Гапанович М. В., Гак В. Ю., Гадомская А. В., Певцов Д. Н., Качаба А. В., Кириченко А. С., Демкин Д. В., Иванова В. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф. / Прикладная физика. 2025. № 1. С. 54. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2025-1-45-54>.
10. Yin X., Guo Y., Xie H., Que W., Kong L. B. / Sol. RRL. 2018. P. 1900001. <https://doi.org/10.1002/solr.201900001>.

11. Lian X., Chen J., Shan S., Wu G., Chen H. / ACS Appl. Mater. Interfaces. 2020. Vol. 12. № 41. P. 46340–46347. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c11731>.

12. Ajili M., Jebbari N., Turki N. K., Castagné M. / International Renewable Energy Congress. 2010. IREC2010, November 5–7, Sousse, Tunisia. P. 305–309.

13. Moreels I., Lambert K., Smeets D., De Muynck D., Nollet T., Martins J. C., Vanhaecke F., Van-tomme A., Delerue C., Allan G., Hens Z. / ACS Nano. 2009. Vol. 3. № 10. P. 3023–3030.

<https://doi.org/10.1021/nn900863a>.

14. Beygi H., Abdolkarim Sajjadi S., Babakhani A., Young J. F., van Veggel F. C. J. / Applied Surface Science. 2018. Vol. 457. P. 1–10.

<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.152>.

15. Гусарова Н. И., Коцавцев Н. Ф., Понов С. В. / Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 288–292. <https://doi.org/10.1134/S1064226916100144>.

16. Voilmerhausen R., Maurer T. / Proc. of SPIE. 2003. Vol. 5076. P. 60–69. <https://doi.org/10.1117/12.487189>.

PACS: 85, 85.60.–q

Extended spectral response (0.4–2.0 μm) uncooled colloidal quantum dot PbS photodetector for large format 640×512 with electron blocking layer based on $p\text{-NiO}_x$

V. P. Ponomarenko^{1,2}, V. S. Popov^{1,2,*}, M. A. Pankov¹, K. A. Khamidullin¹, A. D. Deomidov¹, A. A. Fedorov¹, G. Yu. Deev¹, D. E. Dragunov¹, O. V. Epifanov¹, S. I. Zaripov¹, P. S. Lazarev¹, E. V. Mirofyanchenko¹, D. V. Ilyinov¹, V. A. Petrushina¹, I. D. Burlakov¹, A. V. Polessky¹, V. V. Startsev¹, S. B. Brichkin^{2,3}, M. G. Spirin^{2,3}, S. A. Tovstun^{2,3}, M. V. Gapanovich^{2,3}, V. Yu. Gak^{2,3}, A. V. Gadomska^{2,3}, D. N. Pevtsov², A. V. Katsaba², A. S. Kirichenko², D. V. Demkin², V. A. Ivanova², V. V. Ivanov² and V. F. Razumov^{2,3}

¹ RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

* E-mail: popov.vs@mipt.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701 Russia

³ Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry Russian Academy of Science, Chernogolovka, Moscow Region, 142432 Russia

Received 3.03.2025; revised 25.03.2025; accepted 7.04.2025

Imaging in the infrared wavelength with extended spectral range from 0.4 μm to 2.0 μm has been fundamental for scientific, civil and special applications. In this paper structure and main characteristics of large format 640×512 (pitch 15 μm) photodetector with extended spectral response (0.4–2.0 μm) based on colloidal quantum dot were presented. The main part of photocurrent was generated in CQDs $n\text{-PbS-TBAI}$ layer. This layer was fabricated by solid-state exchange of initial long-chain ligand (oleic acid) with iodine after tetra- n -butylammonium (TBAI) treatment. Electron blocking layer (hole transport layer) fabricated by deposition of $p\text{-NiO}_x$. Hole blocking layer (electron transport layer) was made by deposition of $n\text{-ZnO}$.

Keywords: colloidal quantum dot (CQD); ligand; transport layer; photosensor.

REFERENCES

1. Popov V. S. and Ponomarenko V. P. New photosensors: 0D vs 2D. Moscow, MIPT, 2024.
2. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A., Ivanov V. V. and Razumov V. F., Russ. Chem. Rev. **93** (4), RCR5113 (2024). <https://doi.org/10.59761/RCR5113>.
3. Hinds S., Klem E., Gregory C., Hilton A., Hames G. and Violette K., Proc. of SPIE **11407** (2020). <https://doi.org/10.1117/12.2559115>.
4. Malinowski P. E., Georgitzikis E., Maes J., Vamvaka I., Frazzica F., Van Olmen J., De Moor P., Heremans P., Hens Z. and Cheyns D., Sensors **17**, 2867 (2017). <https://doi.org/10.3390/s17122867>.

5. Gréboval C., Darson D., Parahyba V., Alchaar R., Abadie C., Noguier V., Ferré S., Izquierdo E., Khalili A., Prado Y., Potet P. and Lhuillier E., *Nanoscale* **14** (26), 9359–9368 (2022). <https://doi.org/10.1039/D2NR01313D>
6. Popov V. S., Ponomarenko V. P. and Popov S. V., *Journal of Communications Technology and Electronics* **69** (4–6), 219–226 (2024). <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2023-6-45-53>.
7. Burlakov I. D., Grinchenko L. Y., Dirochka A. I. and Zaletaev N. B., *Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics)* **2** (2), 131–136 (2014) [in Russian].
8. Martin T., Dixon P., Gagliardi M.-A. and Masaun N., *Proc. of SPIE* **5726**, 85–91 (2005). <https://doi.org/10.1117/12.596409>.
9. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Pankov M. A., Khamidullin K. A., Deomidov A. D., Fedorov A. A., Deev G. Yu., Dragunov D. E., Epifanov O. V., Lazarev P. S., Mirofyanchenko E. V., Ilyinov D. V., Petrushina V. A., Burlakov I. D., Polesky A. V., Startsev V. V., Brichkin S. B., Spirin M. G., Tovstun S. A., Gapanovich M. V., Gak V. Yu., Gadomska A. V., Pevtsov D. N., Katsaba A. V., Kirichenko A. S., Demkin D. V., Ivanova V. A., Ivanov V. V. and Razumov V. F., *Applied Physics*, № 1, 45–54 (2025). <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2025-1-45-54>.
10. Yin X., Guo Y., Xie H., Que W. and Kong L. B., *Sol. RRL*, 1900001 (2018). <https://doi.org/10.1002/solr.201900001>.
11. Lian X., Chen J., Shan S., Wu G. and Chen H., *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** (41), 46340–46347 (2020). <https://doi.org/10.1021/acsmami.0c11731>.
12. Ajili M., Jebbari N., Turki N. K. and Castagné M., *International Renewable Energy Congress 2010 (IREC2010, November 5–7, Sousse, Tunisia)*, pp. 305–309.
13. Moreels I., Lambert K., Smeets D., De Muynck D., Nollet T., Martins J. C., Vanhaecke F., Vantomme A., Deleue C., Allan G. and Hens Z., *ACS Nano* **3** (10), 3023–3030 (2009). <https://doi.org/10.1021/nn900863a>.
14. Beygi H., Abdolkarim Sajjadi S., Babakhani A., Young J. F. and van Veggel F. C. J., *Applied Surface Science* **457**, 1–10 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.152>.
15. Gusarova N. I., Koshchavtsev N. F. and Popov S. V., *J. Commun. Technol.* **61** (10), 1211–1214 (2016).
16. Voilmerhausen R. and Maurer T., *Proc. of SPIE* **5076**, 60–69 (2003). <https://doi.org/10.1117/12.487189>.

Об авторах

Пономаренко Владимир Павлович, главный конструктор, заведующий кафедрой, д.ф.-м.н., профессор, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9), Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: 2392325@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 6882-8721, Author ID 171358

Попов Виктор Сергеевич, начальник центра, заведующий лабораторией, доцент, к.х.н., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9), Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: popov.vs@mipt.ru. SPIN-код РИНЦ 5846-8066, Author ID 862015

Панков Михаил Александрович, начальник лаборатории, к.ф.-м.н., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: mpa.off@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 7160-9289, Author ID 145651

Хамидуллин Камиль Алиевич, руководитель группы, начальник отдела, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: kamii1986@list.ru. SPIN-код РИНЦ 4091-3295, Author ID 710558

Деomidов Александр Дмитриевич, ведущий инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: aleks.deomidov@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 7744-0080, Author ID 760104

Федоров Артем Алексеевич, инженер 2 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9).

Деев Герман Юрьевич, инженер 2 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: deew.german@ya.ru. SPIN-код РИНЦ 9119-4550, Author ID 1281139

Драгунов Денис Эдуардович, инженер 1 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: dragunov-de@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 9757-8370, Author ID 1234132

Эпифанов Олег Владимирович, ведущий инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9).

Зарипов Шамиль Ильнурович, инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9).

Лазарев Павел Сергеевич, ведущий инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9).

Мирофанченко Екатерина Васильевна, руководитель группы, к.т.н., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: mirofianchenko@gmail.ru. SPIN-код РИНЦ 1825-9300, Author ID 1157308

Ильинов Денис Владимирович, инженер 1 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: dv.iljinov@physics.msu.ru. SPIN-код РИНЦ 2401-2262, Author ID 1033906

Петрушина Виктория Алексеевна, инженер-технолог, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9).

Бурлаков Игорь Дмитриевич, заместитель генерального директора по инновациям и науке, д.т.н., профессор, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: idbur@orion-ir.ru. SPIN-код РИНЦ 6042-3634, Author ID 171368

Полесский Алексей Викторович, главный конструктор по НИОКР, к.т.н., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: av22236@VK.ru. SPIN-код РИНЦ 3992-4520, Author ID 571156

Старцев Вадим Валерьевич, генеральный директор, к.т.н., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: orion@orion-ir.ru. SPIN-код РИНЦ 4028-7138, Author ID 942991

Бричкин Сергей Борисович, заведующий отделом, главный научный сотрудник, д.х.н., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9), Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Россия, Московская обл., г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д. 1). E-mail: brichkin@icp.ac.ru. SPIN-код РИНЦ 1534-8054, Author ID 44021

Спирин Максим Геннадьевич, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, к.х.н., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9), Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Россия, Московская обл., г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д. 1). E-mail: max2004@icp.ac.ru. SPIN-код РИНЦ 9434-0999, Author ID 54508

Товстун Сергей Александрович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., доцент, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9), Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Россия, Московская обл., г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д. 1). E-mail: tovstun@icp.ac.ru. SPIN-код РИНЦ 6114-3430, Author ID 874253

Гапанович Михаил Вячеславович, старший научный сотрудник, к.х.н., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9), Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Россия, Московская обл., г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д. 1). E-mail: gmw1@mail.ru. Author ID 156921

Гак Владимир Юрьевич, научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9), Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Россия, Московская обл., г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д. 1). E-mail: gak@icp.ac.ru. SPIN-код РИНЦ 6311-9408, Author ID 56719

Гадомская Анна Владимировна, старший научный сотрудник, к.х.н., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9), Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Россия, Московская обл., г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д. 1).

Певцов Дмитрий Николаевич, инженер-технолог, младший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: pevtsov.dn@phystech.edu. SPIN-код РИНЦ 3117-5473, Author ID 1147563

Кацаба Алексей Викторович, старший научный сотрудник, заместитель заведующего лабораторией, к.ф.-м.н., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: atsaba@sci.lebedev.ru. SPIN-код РИНЦ 5974-0289, Author ID 724698

Кириченко Алексей Сергеевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: kirichenko@cosmos.ru. SPIN-код РИНЦ 9922-1027, Author ID 342444

Дёмкин Дмитрий Викторович, младший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9).

Иванова Валерия Антоновна, научный сотрудник, к.ф.-м.н., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: adu_99@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 4277-9943, Author ID 1205481

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

Разумов Владимир Федорович, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАН, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Россия, Московская обл., г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д. 1). E-mail: azumov@icp.ac.ru. SPIN-код РИНЦ 1361-7759, Author ID 44050