

УДК 621.  
EDN: AYVMCY

PACS: 85, 85.60.–q

**Неохлаждаемый матричный фотосенсор 640×512 для области спектра 0,4–2,0 мкм из коллоидных квантовых точек ККТ PbS с транспортным слоем для дырок на основе ККТ p-PbS-EDT**

*В. П. Пономаренко, В. С. Попов, М. А. Панков, К. А. Хамидуллин, А. Д. Деомидов, А. А. Федоров, Г. Ю. Деев, Д. Э. Драгунов, О. В. Епифанов, П. С. Лазарев, Е. В. Мирофьянченко, Д. В. Ильинов, В. А. Петрушина, И. Д. Бурлаков, А. В. Полесский, В. В. Старцев, С. Б. Бричкин, М. Г. Спирын, С. А. Товстун, М. В. Гапанович, В. Ю. Гак, А. В. Гадомская, Д. Н. Певцов, А. В. Кацаба, А. С. Кириченко, Д. В. Дёмкин, В. А. Иванова, В. В. Иванов, В. Ф. Разумов*

*Приведены архитектура и основные характеристики матричного фотосенсора формата 640×512 (шаг 15 мкм) с чувствительностью в области спектра 0,4–2,0 мкм, разработанного на основе коллоидных квантовых точек ККТ PbS. Слой генерации основной доли фотоносителей изготовлен на основе ККТ n-PbS путем замены исходного лиганда (олеиновая кислота) на йод при обработке слоя ККТ йодидом тетра-*n*-бутиламмония (ТВАИ). Транспортные слои для электронов и дырок изготовлены на основе *n*-ZnO и ККТ *p*-PbS EDT, где транспортный слой для дырок ККТ *p*-PbS-EDT создавался путем замены исходного лиганда при обработке слоя ККТ этан-1,2-дитиолом (EDT).*

*Ключевые слова:* коллоидная квантовая точка; фотосенсор; лиганд; фоточувствительность.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-1-45-54

## 1. Введение

Уникальные свойства полупроводниковых структур ограниченной размерности всё больше привлекают внимание исследователей в таких областях, как фотоника, биомедицина, микроэлектроника и др. Особенно заметен прогресс последних лет, достигнутый при использовании квазиульмерных квантовых точек при создании устройств солнечной энергетики [1], биомаркеров [2], матричных фотоприемных устройств (МФПУ) [3], лазеров [4] и др.

В настоящее время в области промышленного производства оптоэлектроники с использованием коллоидных квантовых точек лидируют две компании – SWIR Vision (США) и Quantum Solutions (Великобритания), серийно выпускающие широкоспектральные полноформатные матричные фотосенсоры и ноч-

ные видеокамеры на их основе с диапазоном фоточувствительности от 0,4 до 2,0 мкм, изготовленные по гибридно-монолитной технологии. В 2020 году фирма SWIR Vision продемонстрировала образцы неохлаждаемых МФПУ форматов 640×512, 1280×1024 и 1920×1080, разработанные на основе коллоидных квантовых точек из сульфида свинца с шагом фоточувствительных элементов (ФЧЭ), равным 15 мкм. Сейчас линейка выпускаемых фирмой изделий насчитывает 5 типов МФПУ, включая фотосенсоры с форматом 2040×2040 и 3064×2040, имеющие шаг ФЧЭ, равный 7 мкм. Компания Quantum Solutions в 2024 году представила МФПУ формата 640×512 из коллоидных квантовых точек сульфида свинца с наименьшим из достигнутых на сегодня в промышленных образцах МФПУ шагом, составившим 5 мкм. Обе фирмы производят малогабаритные камеры ночного видения с ис-

пользованием МФПУ из коллоидных квантовых точек собственной разработки.

Ранее в работе [5] был описан разработанный нами одноэлементный фотосенсор для области спектра 0,4–2,0 мкм, изготовленный из коллоидных наночастиц PbS на подложке Si/SiO<sub>2</sub> с архитектурой, показанной на рисунке 1а. Исследовались малоразмерные фоточувствительные элементы 12×12 мкм диодного типа с энергетическим барьером типа *p–n*-перехода на контакте слоёв коллоидных квантовых точек (ККТ) сульфида свинца (PbS) *n*- и *p*-типов проводимости. Энергетический барьер типа *p–n*-перехода был получен путем модификации поверхности ККТ соответствующими лигандами. Слой ККТ PbS электронного типа проводимости (*n*-тип) создавался при замене исходного лиганда, применяемого при синтезе ККТ (олеиновая кислота C<sub>18</sub>H<sub>34</sub>O<sub>2</sub>), на йод (I) путем обработки слоя ККТ PbS йодидом тетра-*n*-бутиламмония [(C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>4</sub>N]I (TBAI). Аналогично, слой ККТ PbS дырочного типа проводимости (*p*-тип) создавался путем замены исходного лиганда после обработки слоя ККТ PbS этан-1,2-дитиолом C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>S<sub>2</sub> (EDT). Основную роль в поглощении излучения из спектрального интервала 0,4–2,0 мкм играл слой ККТ *n*-PbS-TBAI электронного типа проводимости ввиду его существенно большей толщины по сравнению со слоем ККТ *p*-PbS-EDT. Слой ККТ *p*-PbS-EDT выполнял роль слоя, блокирующего электроны в

зоне вблизи анода фоточувствительной структуры и, одновременно, служил каналом транспорта дырок. Размеры ККТ PbS для слоев *n*- и *p*-типов проводимости имели диаметр 7,6 нм и 3,1 нм, соответственно, что создавало на контакте этих слоев дополнительный энергетический гетеробарьер, способствующий эффективному разделению фотоносителей, образовавшихся после распада фотоэкситонов в слое ККТ *n*-PbS-TBAI. В качестве прекурсора свинца использовался хлорид свинца (PbCl<sub>2</sub>) и *N,N'*-дифенилтиомочевина (SC(NHPh)<sub>2</sub>) в качестве прекурсора серы. Слой наночастиц *n*-ZnO электронного типа проводимости выполнял роль слоя, блокирующего поток дырок в зоне вблизи катода и, одновременно, служил каналом транспорта электронов к катоду. Верхний прозрачный для излучения электрод создавался методом аэрозольной печати слоя на основе нанонитей из серебра (AgNW), имеющих оптическое пропускание в области длин волн 0,4–2,0 мкм порядка 65–70 % и высокую проводимость [6], что выгодно отличает их от проводящих покрытий из углеродных нанонитей или ИТО (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>0,9</sub>(SnO<sub>2</sub>)<sub>0,1</sub> (см. рис. 1б). Таким образом, архитектура разработанных в работе [5] фотосенсоров имела вид Cr/Ni/*n*-ZnO/ККТ *n*-PbS-TBAI/ККТ *p*-PbS-EDT/AgNW. Энергетическое строение отдельных слоев этой структуры показано на рисунке 2.

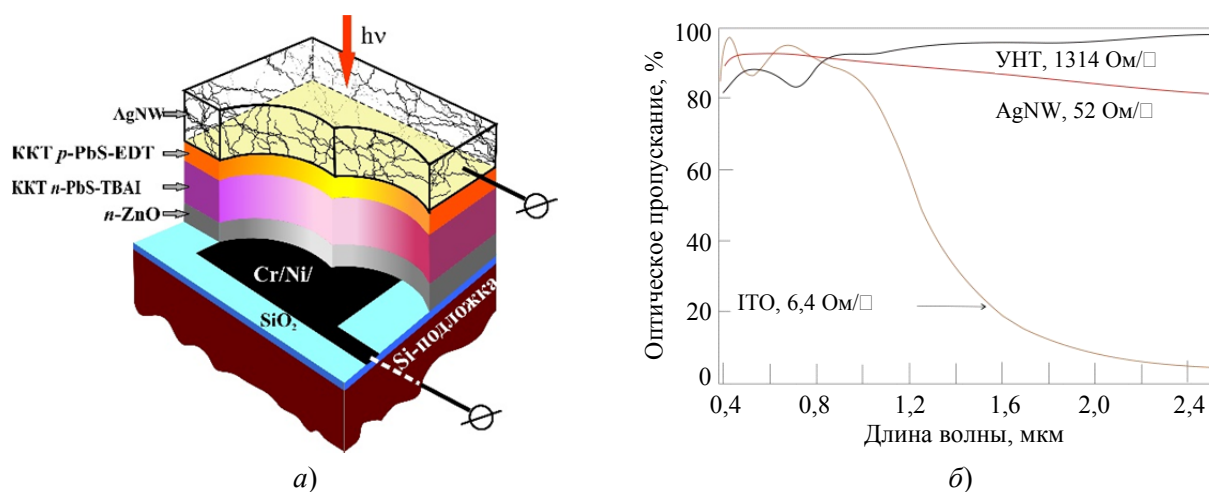


Рис. 1. Одноэлементный фотосенсор на основе коллоидных квантовых точек ККТ PbS с транспортными слоями для электронов и дырок из наночастиц *n*-ZnO и ККТ *p*-PbS-EDT, соответственно: а) – архитектура фотосенсора [5]; б) – оптическое пропускание и удельное сопротивление слоев углеродных нанотрубок (УНТ), серебряных нанонитей (AgNW) и покрытий из (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>0,9</sub>(SnO<sub>2</sub>)<sub>0,1</sub> (ИТО) [6]

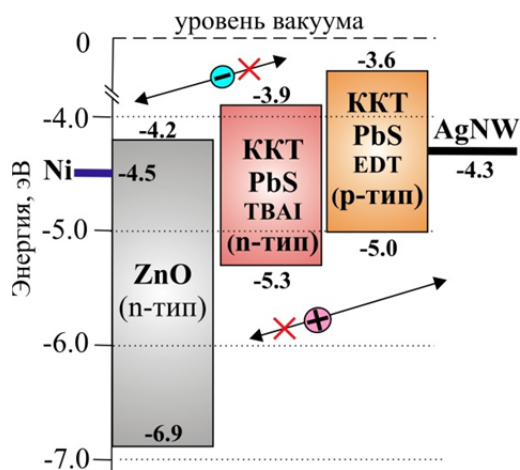


Рис. 2. Энергетическое строение слоев структуры Cr/Ni/n-ZnO/KKTP-PbS-TBAI/KKTP-PbS-EDT/AgNW, на основе которой изготовлен одноэлементный фотосенсор [5]

Спектральная зависимость относительной чувствительности сенсора представлена на рисунке 3а. Кривые вольт-амперных характеристик (ВАХ) фотосенсоров имели вид, типичный для полупроводниковых структур с энергетическим барьером и дифференциальным сопротив-

лением темновой ВАХ при нулевом смещении, лежащем в пределах  $(2-20) \times 10^{10}$  Ом. Были реализованы значения удельной обнаружительной способности  $(2-4) \times 10^{12}$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup> (рис. 3б) при освещении фотосенсора излучением АЧТ с температурой 1273 К.

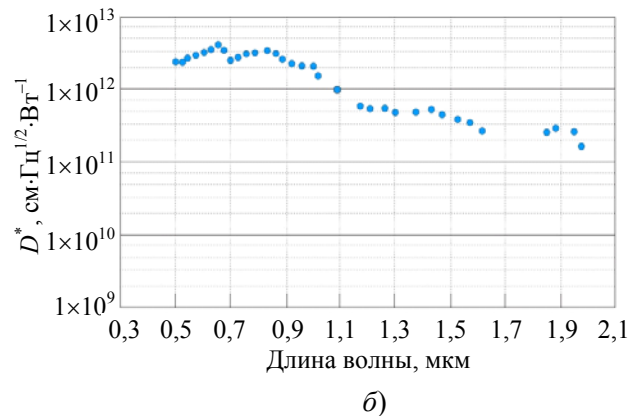
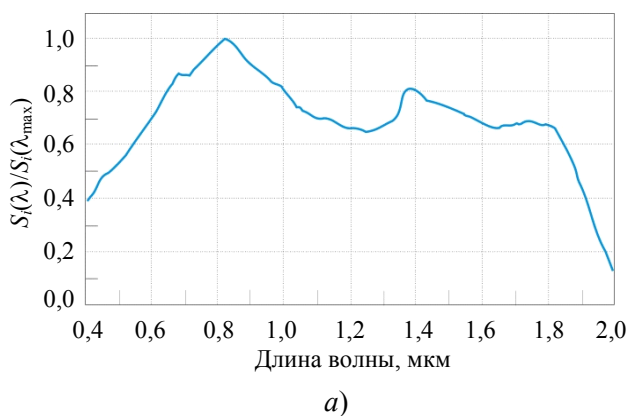


Рис. 3. Спектральные зависимости относительной фоточувствительности (а) [5] и удельной обнаружительной способности (б) одноэлементного фотосенсора на основе коллоидных квантовых точек PbS с архитектурой Cr/Ni/n-ZnO/KKTP-PbS-TBAI/KKTP-PbS-EDT/AgNW

## 2. Архитектура матричного фотосенсора формата 640×512

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 р-канального типа. Архитектура МФПУ показана на рисунке 4.

Изготовление такого МФПУ основано на непосредственном формировании фоточувствительной структуры на поверхности крем-

ниевой СБИС считывания и предварительной обработки фотосигналов. Фоточувствительные и функциональные слои сенсора изготавливаются путем поочередного нанесения заранее синтезированных жидких суспензий наночастиц с заданным составом и вязкостью с использованием техники спин-коатинга (spin-coating) или методом аэрозольной печати. Это обеспечивает изготовление монолитной структуры без использования индиевых или иных микроконтактов, характерных для классической технологии гибридации (объединения) матричных фотодиодов или фоторезисторов на основе слоев объемных или эпитаксиальных полупроводниковых 3D-мате-

риалов с микроэлектроникой считывания фото-сигналов. Такая технология изготовления фотосенсоров, получившая название гибридно-монокристаллической, в общих чертах описана в работах [3, 5, 7–9]. Она обеспечивает снятие критически важных ограничений по шагу чувствительных эле-

ментов, в результате чего шаг матрицы ограничивается только дифракционным пределом и шагом СБИС считывания, который определяется схемотехникой ячейки считывания и топологической нормой КМОП технологии, по которой изготовлена кремниевая СБИС.

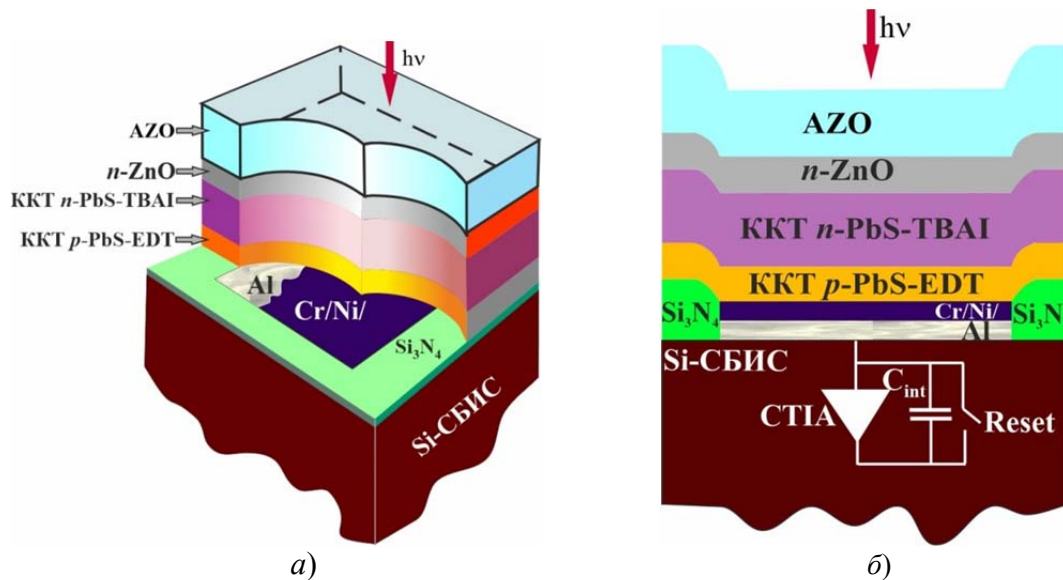


Рис. 4. Матричный фотосенсор  $640 \times 512$  на основе коллоидных квантовых точек ККТ PbS с транспортными слоями для дырок и электронов из ККТ p-PbS-EDT и n-ZnO, соответственно: а) – архитектура фотосенсора; б) – поперечное сечение фоточувствительного элемента с входным устройством ячейки считывания кремниевой СБИС (СТИА – трансимпедансный усилитель, Reset – ключ сброса,  $C_{int}$  – емкость накопления фотосигнала)

Архитектура каждого фоточувствительного элемента, разработанного авторами нового матричного фотосенсора  $640 \times 512$  из ККТ PbS, имеет вид Cr/Ni/ККТp-PbS-EDT/ККТn-PbS-TBAI/n-ZnO/AZO. Энергетическое строение отдельных слоев структуры, демонстрирующее направления транспорта электронов и дырок в слоях фотосенсора, показано на рисунке 5.

Как и в случае одноэлементного фотосенсора [5], описанного выше, основная доля фотоносителей генерируется излучением в слое ККТ n-PbS-TBAI. После распада фотоэкситонов электроны и дырки разделяются энергетическим барьером типа p-n-перехода на контакте слоев ККТ n-PbS-TBAI и ККТ p-PbS-EDT. Слои n-ZnO и ККТ p-PbS-EDT служат для блокировки дырок и электронов в областях, расположенных вблизи анода и катода. Они же являются каналами транспорта электронов и дырок.

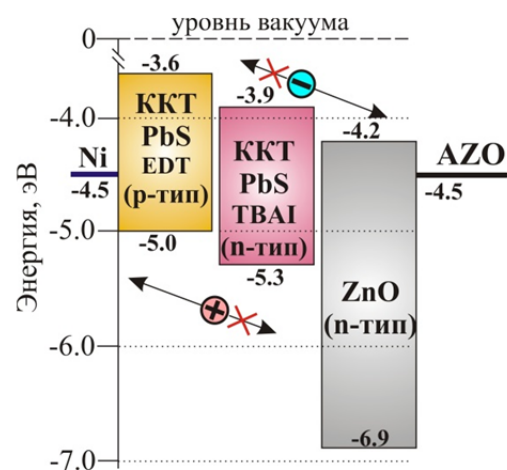


Рис. 5. Энергетическое строение слоев структуры Cr/Ni/ККТp-PbS-EDT/ККТn-PbS-TBAI/n-ZnO/AZO, на основе которой изготовлен матричный фотосенсор  $640 \times 512$ , демонстрирующая направления транспорта электронов и дырок

Изготовление слоев ККТ PbS электронного и дырочного типов проводимости проводится путем замены исходного лиганда (олеи-



новая кислота) после обработки йодидом тетра-*n*-бутиламмония (*n*-тип) и этан-1,2-дитиолом (*p*-тип). В качестве прекурсоров свинца и серы при синтезе ККТ PbS, как и в работе [5], применяются хлорид свинца и *N,N'*-дифенилтиомочевина. Кроме того, в отличие от описанного выше одноэлементного фотосенсора с архитектурой Cr/Ni/*n*-ZnO/ККТ*n*-PbS-ТВАИ/ККТ*p*-PbS-EDT/AgNW, здесь в качестве прозрачного для излучения электрода вместо слоя на основе нанонитей AgNW нами использовано покрытие из оксида цинка, допированного алюминием с образованием твердого раствора в системе ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (AZO) [10]. 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 Al:ZnO (AZO), смонтированного на растре для исследований, показана на рисунке 6.

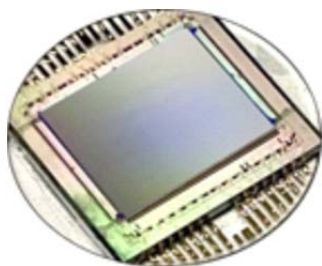


Рис. 6. Фотография матричного фоточувствительного элемента 640×512 со СБИС считывания и предварительной обработки фотосигналов на растре

### 3. Свойства матричного фотосенсора формата 640×512 с транспортным слоем для дырок на основе ККТ *p*-PbS-EDT

С целью контроля размера синтезированных коллоидных квантовых точек использовалась просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения (ПЭМ). Исследовались спектральные зависимости оптического поглощения суспензии коллоидных квантовых точек сульфида свинца в растворе *n*-октана, синтезированных вышеописанным способом с использованием PbCl<sub>2</sub> в качестве прекурсора свинца. Наблюдался первый экситонный пик поглощения с максимумом, расположенным на длине волны  $\lambda_{\max} \approx 1,85$  мкм.

Его ширина на полувысоте (FWHM) составила величину 220 нм, что свидетельствует о достаточно высокой монодисперсности нанокристаллов PbS в поглощающем слое ККТ *n*-PbS-ТВАИ. На рисунке 7 показана приведенная к единице спектральная зависимость фоточувствительности  $S_i(\lambda)/S_i(\lambda_{\max})$  изготовленного матричного фотосенсора 640×512 с кремниевой СБИС считывания и предварительной обработки фотосигналов.

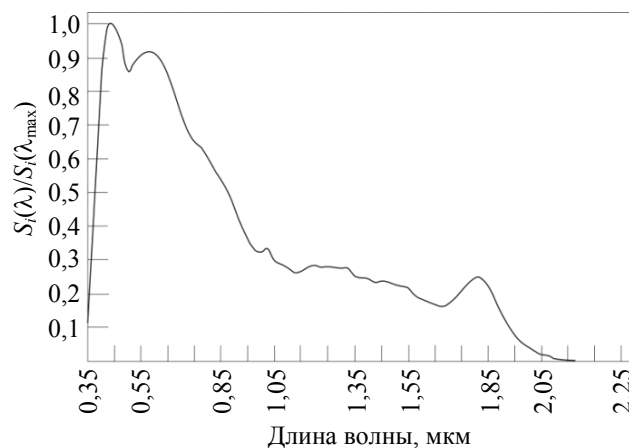
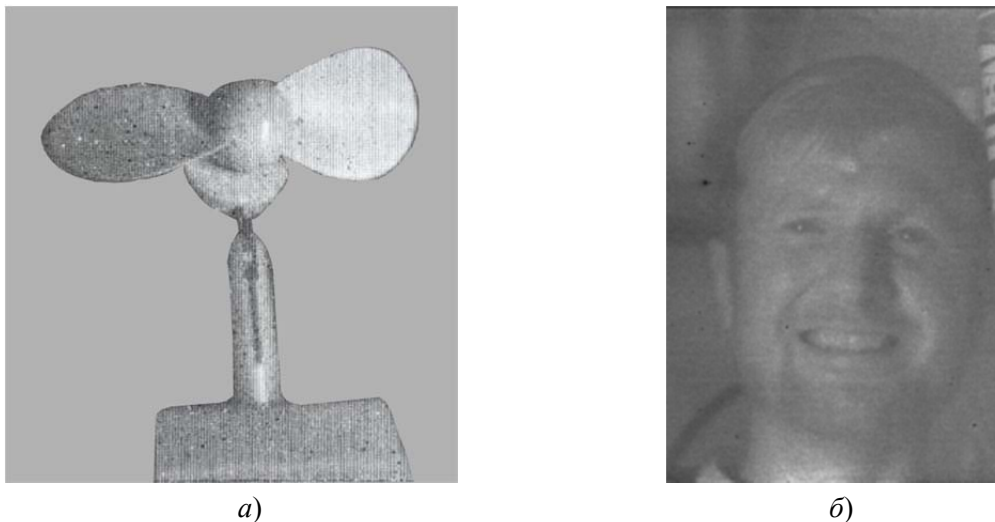


Рис. 7. Приведенная к единице спектральная зависимость фоточувствительности при комнатной температуре матричного фотосенсора формата 640×512 с кремниевой СБИС считывания и предварительной обработки фотосигналов

Использование эмпирического соотношения  $E_0 = 0,41 + (0,025d^2 + 0,283d)^{-1}$ , устанавливающего связь между энергией оптических переходов  $E_0$  в спектрах оптического поглощения раствора ККТ и диаметром  $d$  наночастиц, полученного в работе [11], показало, что диаметр используемых нами коллоидных квантовых точек составляет величину  $d \approx 9,5-10$  нм. Исследование формы наночастиц, проведенное методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, показало, что она близка к усеченному октаэдру. Каждая коллоидная квантовая точка имеет восемь граней (111) и шесть граней (100).

На рисунке 8 представлены фрагменты изображений лопастей вентилятора 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. 8.** Фрагменты изображений, полученные с применением неохлаждаемого матричного фотосенсора с архитектурой  $\text{Cr/Ni/KKTp-PbS-EDT/KKTn-PbS-TBAI/n-ZnO/AZO}$  формата  $640 \times 512$  (шаг  $15 \text{ мкм}$ ) на основе коллоидных квантовых точек из  $\text{PbS}$  для области спектра  $0,4\text{--}2,0 \text{ мкм}$

#### 4. Заключение

Одним из направлений совершенствования приборов ночного видения (ПНВ) является расширение областей их спектральной чувствительности. Чувствительность современных серийно выпускаемых электронно-оптических преобразователей (ЭОП), включая поколение  $3^+$  с фотокатодами на основе арсенида галлия с отрицательным электронным сродством, ограничена спектральным диапазоном  $0,4\text{--}0,9 \text{ мкм}$ . С ним связан ряд недостатков современных ПНВ, из-за которых могут не обеспечиваться требования по дальности, вероятности обнаружения и опознавания. Главным из них является недостаточная дальность видения ПНВ при ночной освещенности наблюдаемой сцены ниже  $2 \times 10^{-3} \text{ лк}$ . Такая освещенность характерна для объектов, находящихся в горных ущельях, туннелях, на неосвещенных городских улицах, под пологом леса и т. д. Она обусловлена рассеянным или прямым светом Луны, звёзд, зодиакальным светом, собственным излучением верхних слоев атмосферы, связанным с рекомбинацией ионов, образовавшихся в дневное время и т. п. На рисунке 9а показана спектральная зависимость плотности мощности естественной ночной освещенности (ЕНО) на вертикальной по-

верхности [12]. Видно, что уровень освещенности существенно возрастает в области длин волн  $\Delta\lambda = 0,4\text{--}1,8 \text{ мкм}$  по сравнению с интервалом  $\Delta\lambda = 0,4\text{--}0,9 \text{ мкм}$ , характерным для современных серийно выпускаемых ЭОП. Так, средняя величина ЕНО в отсутствие Луны в области длин волн  $0,6\text{--}0,8 \text{ мкм}$  в ясную погоду (снежный фон) составляет  $(1,5\text{--}3,0) \times 10^{-5} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{мкм}$ , тогда как в области  $1,4\text{--}1,8 \text{ мкм}$  даже при сплошной облачности (зеленый фон) она возрастает до  $(6,0\text{--}7,0) \times 10^{-4} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{мкм}$ . Источником освещенности здесь является излучение атмосферного кислорода. Вместе с ростом освещенности возникает значительный выигрыш по оптическому пропусканию атмосферы при переходе из области спектра  $0,4\text{--}0,9 \text{ мкм}$  в область  $0,4\text{--}1,8 \text{ мкм}$  (рис. 9б). Ослабление атмосферой светового потока связано с поглощением света парами воды и углекислым газом и рассеянием на флуктуациях плотности газовой среды атмосферы и на различных твердых частицах пыли. Оценка, проведенная в работе [13], показала, что при метеорологической дальности видения  $S_M = 10 \text{ км}$  пропускание слоя атмосферы толщиной  $1 \text{ км}$  на длине волны  $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$  составляет величину  $0,72$ , а в центре окна прозрачности  $1,4\text{--}1,8 \text{ мкм}$  она возрастает до значения  $0,93$ .

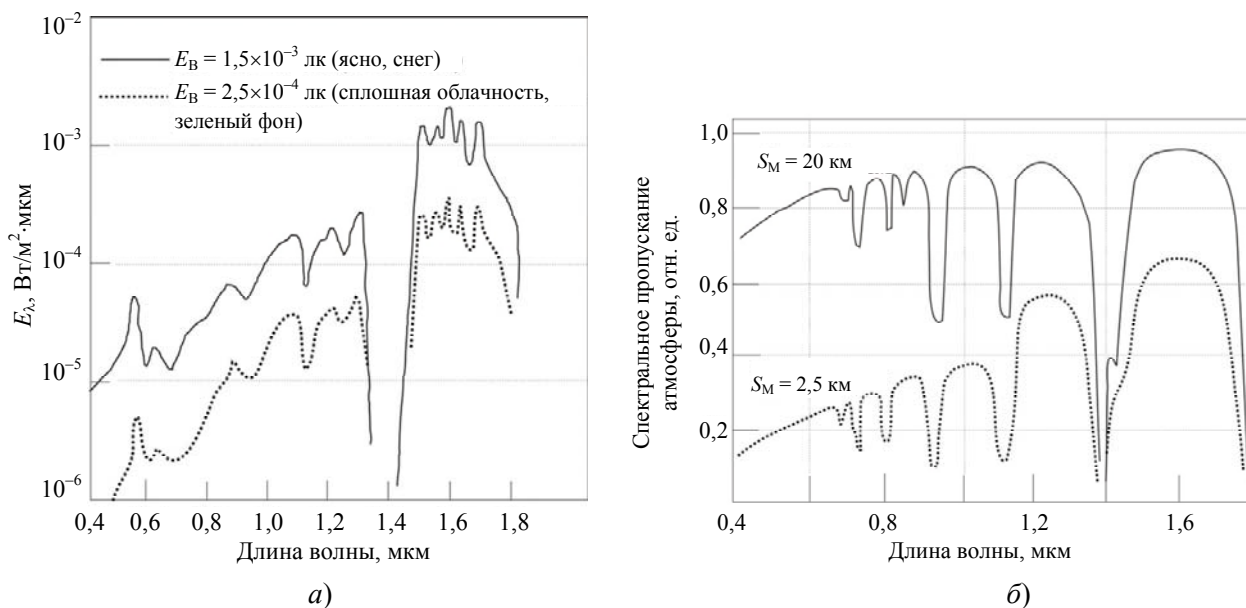


Рис. 9. а) – спектральная зависимость плотности мощности естественной ночной освещенности на вертикальной поверхности  $E_B$  в условиях сплошной облачности (зеленый фон) и для случая ясной погоды на фоне поверхности, покрытой снегом; б) – спектральная зависимость пропускания атмосферного слоя толщиной 1 км для случаев метеорологической дальности видения  $S_M = 20$  км и  $S_M = 2,5$  км [12]

Матричные фотосенсоры на основе эпитаксиального  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$  с подложкой из  $InP$ , технология которых в настоящее время достигла высокого уровня развития, легко реализуют длинноволновую границу фоточувствительности  $\lambda_{co} \cong 1,6$  мкм. Однако, для обеспечения чувствительности в видимом диапазоне при их изготовлении необходимо применение специальных технологических операций утоньшения подложки  $InP$  после гибридации со СБИС считывания фотосигналов [14]. Остающийся после этого слой  $InP$  толщиной порядка 0,2 мкм всё равно ограничивает квантовую эффективность фотосенсора в видимом диапазоне величиной  $\leq 60$  %. Необходимость применения индиевых или медных микроконтактов для гибридации матрицы фоточувствительных элементов из (ФЧЭ)  $InGaAs$  с Si СБИС считывания фотосигналов ограничивает минимальный шаг ФЧЭ величиной порядка 5 мкм.

В матрицах из ККТ используется фронтальная засветка и отсутствуют какие бы то ни было подложки, ограничивающие фоточувствительность в видимом диапазоне электромагнитного излучения. Не требуются также металлические микроконтакты для гибридации матрицы фоточувствительных элементов с Si СБИС считывания фотосигналов. Использование гибридно-монокристаллических способов изготовления [7] позволяет создавать на

основе ККТ широкоспектральные матрицы с диапазоном чувствительности 0,4–2,0 мкм и шагом фоточувствительных элементов, ограниченным только дифракционным пределом регистрируемого излучения и схемотехникой ячейки считывания и топологической нормой КМОП-технологии, по которой изготавливается Si СБИС считывания фотосигналов.

Работа выполнена при поддержке Фонда перспективных исследований.

### ЛИТЕРАТУРА

1. You H. R., Park J. Y., Lee D. H., Kim Y., Choi J. / Appl. Sci. 2020. Vol. 10. P. 975. <https://doi.org/10.3390/app10030975>
2. Panja A., Patra P. / Inorganic Nanoparticle Luminescence: Design and Application. 2023. Vol. 6 (4). <https://doi.org/10.1051/fopen/20222020>
3. Пономаренко В. П., Попов В. С., Шуклов И. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф. / Успехи химии. 2024. Vol. 93 (4). P. RCR 5113. <https://doi.org/10.59761/RCR5113>
4. Wang Y., Sun H. / Progress in Quantum Electronics. 2018. Vol. 60. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2018.05.002>
5. Попов В. С., Пономаренко В. П., Дёмкин Д. В., Шуклов И. А., Гадомская А. В., Бричкин С. Б., Лаврентьев Н. А., Гак В. Ю., Мирофьянченко А. Е., Мирофьянченко Е. В., Кацаба А. В., Арсенов П. В., чл.-корр. РАН Иванов В. В., чл.-корр. РАН Разумов В. Ф. / Доклады

Российской Академии наук. Физика, Технические науки. 2023. Т. 511. С. 78–82.

<https://doi.org/10.31857/S2686740023040120>

6. Langley D., Giusti G., Mayousse C., Celle C., Bellet D., Simonato J.-P. / Nanotechnology. 2013. Vol. 24 (45). P. 452001.

<https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/45/452001>

7. Попов В. С., Пономаренко В. П., Попов С. В. / Прикладная физика. 2023. № 6. С. 45–53.

<https://doi.org/10.51368/1996-0948-2023-6-45-53>

8. Malinowski P. E., Georgitzikis E., Maes J., Vamvaka I., Frazzica F., Van Olmen J., De Moor P., Heremans P., Hens Z., Cheyons D. / Sensors. 2017. Vol. 17. P. 2867. <https://doi.org/10.3390/s17122867>

9. Klem E. J. D., Lewis J., Gregory C., Cunningham G., Temple D. / Proc. of SPIE. 2012. Vol. 8353. P. 835337.

10. Ajili M., Jebbari N., Turki N. K., Castagné M. / International Renewable Energy Congress (IREC2010, November 5–7, Tunisia), pp. 305–310.

11. Moreels I., Lambert K., Smeets D., De Muynck D., Nollet T., Martins J. C., Vanhaecke F., Vantomme A., Delerue C., Allan G., Hens Z. / ACS Nano. 2009. Vol. 3 (10). P. 3023–3030.

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

12. Гусарова Н. И., Коцавцев Н. Ф., Попов С. В. / Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 288–292.

13. Коцавцев Н. Ф., Коцавцев А. Н., Федотова С. Ф. / Прикладная физика. 1999. № 3. С. 66–69.

14. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. / Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131–162.

**Пonomаренко Владимир Павлович**<sup>1,2</sup>, гл. конструктор, зав. кафедрой, д.ф.-м.н., профессор.

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

E-mail: [popov.vs@mipt.ru](mailto:popov.vs@mipt.ru)

**Панков Михаил Александрович**<sup>1</sup>, нач. лаб., к.ф.-м.н.

**Хамидуллин Камиль Алиевич**<sup>1</sup>, рук. группы, нач. отдела.

**Деомидов Александр Дмитриевич**<sup>1</sup>, вед. инженер.

**Федоров Артем Алексеевич**<sup>1</sup>, инженер 2 кат.

**Деев Герман Юрьевич**<sup>1</sup>, инженер 2 кат.

**Драгунов Денис Эдуардович**<sup>1</sup>, инженер 1 кат.

**Епифанов Олег Владимирович**<sup>1</sup>, вед. инженер.

**Лазарев Павел Сергеевич**<sup>1</sup>, вед. инженер.

**Мирофяченко Екатерина Васильевна**<sup>1</sup>, рук. группы, к.т.н.

**Ильинов Денис Владимирович**<sup>1</sup>, инженер 1 кат.

**Петрушина Виктория Алексеевна**<sup>1</sup>, инженер-технолог.

**Бурлаков Игорь Дмитриевич**<sup>1</sup>, зам. ген. директора по инновациям и науке, д.т.н., профессор.

**Полесский Алексей Викторович**<sup>1</sup>, гл. конструктор по НИОКР, к.т.н.

**Старцев Вадим Валерьевич**<sup>1</sup>, ген. директор, к.т.н.

**Бричкин Сергей Борисович**<sup>2,3</sup>, зав. отделом, гл.н.с., д.х.н.

**Спирин Максим Геннадьевич**<sup>2,3</sup>, с.н.с., в.н.с., к.х.н.

**Товстун Сергей Александрович**<sup>2,3</sup>, с.н.с., к.ф.-м.н., доцент.

**Гапанович Михаил Вячеславович**<sup>2,3</sup>, с.н.с., к.х.н.

**Гак Владимир Юрьевич**<sup>2,3</sup>, н.с.

**Гадомская Анна Владимировна**<sup>2,3</sup>, с.н.с., к.х.н.

**Певцов Дмитрий Николаевич**<sup>2,3</sup>, инженер-технолог, м.н.с.

**Кацаба Алексей Викторович**<sup>2</sup>, с.н.с. – зам. зав. лаб., к.ф.-м.н.

**Кириченко Алексей Сергеевич**<sup>2</sup>, с.н.с., к.ф.-м.н.

**Дёмкин Дмитрий Викторович**<sup>2</sup>, м.н.с.

**Иванова Валерия Антоновна**<sup>2</sup>, н.с., к.ф.-м.н.

**Иванов Виктор Владимирович**<sup>2</sup>, директор института квантовых технологий МФТИ, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН.

**Разумов Владимир Федорович**<sup>2,3</sup>, гл.н.с. – зав. лаб., д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАН.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

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

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

<sup>3</sup> Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН. Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, проспект академика Семенова, 1.

Статья поступила в редакцию 9.01.2025

После доработки 6.02.2025

Принята к публикации 10.02.2025

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Пономаренко В. П., Попов В. С., Панков М. А., Хамидуллин К. А., Деомидов А. Д., Федоров А. А., Деев Г. Ю., Драгунов Д. Э., Епифанов О. В., Лазарев П. С., Мирофяченко Е. В., Ильинов Д. В., Петрушина В. А., Бурлаков И. Д., Полесский А. В., Старцев В. В., Бричкин С. Б., Спирин М. Г., Товстун С. А., Гапанович М. В., Гак В. Ю., Гадомская А. В., Певцов Д. Н., Кацаба А. В., Кириченко А. С., Дёмкин Д. В., Иванова В. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф., 2025



## Uncooled colloidal quantum dot PbS photodetector for large format 640×512 with hole transport layer based on CQDs p-PbS-EDT and spectral response from 0.4 $\mu\text{m}$ to 2.0 $\mu\text{m}$

V. P. Ponomarenko<sup>1,2</sup>, V. S. Popov<sup>1,2</sup>, M. A. Pankov<sup>1</sup>, K. A. Khamidullin<sup>1</sup>, A. D. Deomidov<sup>1</sup>, A. A. Fedorov<sup>1</sup>, G. Yu. Deev<sup>1</sup>, D. E. Dragunov<sup>1</sup>, O. V. Epifanov<sup>1</sup>, P. S. Lazarev<sup>1</sup>, E. V. Mirofyanchenko<sup>1</sup>, D. V. Ilyinov<sup>1</sup>, V. A. Petrushina<sup>1</sup>, I. D. Burlakov<sup>1</sup>, A. V. Polessky<sup>1</sup>, V. V. Startsev<sup>1</sup>, S. B. Brichkin<sup>2,3</sup>, M. G. Spirin<sup>2,3</sup>, S. A. Tovstun<sup>2,3</sup>, M. V. Gapanovich<sup>2,3</sup>, V. U. Gak<sup>2,3</sup>, A. V. Gadomska<sup>2,3</sup>, D. N. Pevtsov<sup>2</sup>, A. V. Katsaba<sup>2</sup>, A. S. Kirichenko<sup>2</sup>, D. V. Demkin<sup>2</sup>, V. A. Ivanova<sup>2</sup>, V. V. Ivanov<sup>2</sup> and V. F. Razumov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., 111538, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskiy per., 141701, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

<sup>3</sup> Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry  
Russian Academy of Science  
1 prosp. Akademika Semenova, 142432, Chernogolovka, Moscow Region, Russia

Received 9.01.2025; revised 6.02.2025; accepted 10.02.2025

***In this paper structure and main characteristics of large format 640×512 (pitch 15  $\mu\text{m}$ ) photodetector with spectral range from 0.4  $\mu\text{m}$  to 2.0  $\mu\text{m}$  based on PbS colloidal quantum dots was presented. Main part of photocurrent was generated in CQDs n-PbS layer. This layer was fabricated by solid-state exchange of initial long-chain ligand (oleic acid) with iodine after tetra-n-butylammonium iodide treatment. Transport layers for transfer of electrons and holes were made by deposition of n-ZnO and CQDs p-PbS-EDT. Hole transport layer CQDs p-PbS-EDT was made by solid-state exchange of initial long-chain ligand with ethane-1,2-dithiol treatment.***

**Keywords:** colloidal quantum dot; photosensor; ligand; photosensitivity.

### REFERENCES

1. You H. R., Park J. Y., Lee D. H., Kim Y. and Choi J., Appl. Sci. **10**, 975 (2020). <https://doi.org/10.3390/app10030975>
2. Panja A. and Patra P., Inorganic Nanoparticle Luminophore: Design and Application **6** (4) (2023). <https://doi.org/10.1051/fopen/2022020>
3. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A., Ivanov V. V. and Razumov V. F., Russ. Chem. Rev. **93** (4), RCR 5113 (2024). <https://doi.org/10.59761/RCR5113>
4. Wang Y. and Sun H., Progress in Quantum Electronics **60**, 1 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2018.05.002>
5. Popov V. S., Ponomarenko V. P., Dymkin D. V., Shuklov I. A., Gadomska A. V., Brichkin S. B., Lavrentiev N. A., Gak V. U., Mirofyanchenko A. E., Mirofyanchenko E. V., Katsaba A. V., Arsenov P. V., Corresponding Member of the RAS Ivanov V. V. and Corresponding Member of the RAS Razumov V. F., Doklady Physics **68** (7), 233–236 (2023). <https://doi.org/10.31857/S2686740023040120>

6. Langley D., Giusti G., Mayousse C., Celle C., Bellet D. and Simonato J.-P., *Nanotechnology* **24** (45), 452001 (2013). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/45/452001>
7. 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>
8. 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>
9. Klem E. J. D., Lewis J., Gregory C., Cunningham G. and Temple D., *Proc. of SPIE* **8353**, 835337 (2012).
10. Ajili M., Jebbari N., Turki N. K. and Castagné M., *International Renewable Energy Congress (IREC2010, November 5-7, Tunisia)*, pp. 305–310.
11. 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>
12. Gusarova N. I., Koshchavtsev N. F. and Popov S. V., *J. Commun. Technol.* **61** (10), 1211–1214 (2016). <https://doi.org/10.1134/S1064226916100144>
13. Koshchavtsev N. F., Koshchavtsev A. N. and Fedotova S. F., *Applied Physics*, № 3, 66–69 (1999) [in Russian].
14. Burlakov I. D., Grinchenko L. Y., Dirochka A. I. and Zaletaev N. B., *Advances in Applied Physics* **2** (2), 131–136 (2014) [in Russian].