

УДК 621.383
EDN: NERYHW

PACS: 85, 85.60.–q

Фотосенсорика инфракрасного диапазона на основе гибридно-монокристаллических матриц на квантовых точках

В. С. Попов, В. П. Пономаренко, А. И. Дирочка, С. В. Попов

Гибридно-монокристаллические матрицы ИК-диапазона на основе коллоидных квантовых точек (ККТ) активно развиваются в последние несколько лет. Динамика развития и достигнутые на сегодняшний день параметры по шагу, предельному формату и низкой стоимости позволяют говорить о том, что данное направление может обеспечить массовое распространение ИК-камер такого типа в различных сферах, где применение классических гибридных матричных фотоприемников ограничено или невозможно. Статья посвящена базовым вопросам построения таких матриц, анализу передовых достижений по данному направлению, в том числе в России, а также прогнозу возможных применений, которые открываются для ИК-фотосенсорика на основе ККТ.

Ключевые слова: фотосенсор; ИК-матрицы; коллоидные квантовые точки; ККТ; графен; гибридно-монокристаллическая матрица.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-6-54-61

Введение

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений фотосенсорика инфракрасного диапазона в последние несколько лет стала фотосенсорика на основе гибридно-монокристаллических матричных фотоприемников на коллоидных квантовых точках (ККТ) [1–5]. Данный подход, благодаря возможности формирования фоточувствительной структуры из суспензий нанокристаллов непосредственно на поверхности СБИС-считывания без использования индиевых микроконтактов, позволяет снять технологические ограничения на шаг

фоточувствительных элементов и максимальный формат матрицы. Данное направление демонстрирует высокую динамику повышения технических характеристик матриц. В 2020 году была представлена камера для видимой и ближней ИК областей спектра 0,4–2,0 мкм с шагом 15 мкм и форматом 1920×1080 [6], а в 2024 году на рынке уже представлены камеры на основе матриц из коллоидных квантовых точек с форматами 2040×2040 и 3064×2040 и минимальным шагом фоточувствительных элементов 7 мкм [7].

Использование масштабируемых процессов спин-коатинга ККТ при создании

Попов Виктор Сергеевич^{1,2}, зав. лабораторией, нач. центра, доцент, к.х.н.

E-mail: popov.vs@mipt.ru

Пономаренко Владимир Павлович^{1,2}, гл. конструктор, зав. кафедрой, д.ф.-м.н., профессор.

Дирочка Александр Иванович¹, гл. специалист, д.ф.-м.н., профессор.

Попов Сергей Викторович^{3,4}, зам. ген. директора, зав. кафедрой, д.т.н., профессор.

¹ АО «НПО «Орион».

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

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

³ АО «Швабе».

Россия, 129366, Москва, Мира пр., 176.

⁴ Российский университет дружбы народов.

Россия, 115419, Москва, Орджоникидзе, 3.

Статья поступила в редакцию 12.11.2024

После доработки 29.11.2024

Принята к публикации 12.12.2024

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Попов В. С., Пономаренко В. П., Дирочка А. И., Попов С. В., 2024

гибридно-монокристаллических матриц позволяет существенно снизить стоимость матричных фотоприемников ИК диапазона [8, 9].

1. Развитие фотодиодных структур фотосенсоров на основе ККТ

В 2020 компанией SWIR VISION при поддержке DARPA [10] была представлена первая камера на основе фотоприемной матрицы на ККТ. В качестве материала фоточувствительного слоя были использованы ККТ PbS. Архитектура фоточувствительного эле-

мента, использованного при создании матрицы, включала кроме основного поглощающего слоя из ККТ, также барьерные слои для носителей *p*- и *n*-типа, использование которых направлено на повышение эффективности разделения зарядов (электронов и дырок) и, соответственно, повышение квантовой эффективности и ампер-ваттной чувствительности. За последние несколько лет было предложено несколько архитектур фоточувствительных элементов барьерного типа (фотодиодов) для матричных фотоприемников на основе ККТ (табл. 1).

Таблица 1

Архитектуры и основные свойства матричных фотоприемных устройств на основе фотодиодов из коллоидных квантовых точек из сульфида свинца (ККТ PbS)

| | | | | |
|--|---|---------------------------------------|-------------------------------------|--|
| Формат (шаг, мкм) | 640×480 (5) 128×128 (2,1) 128×128 (1,82) | 640×512 (15) | 768×512 (5) | 3064×2040 (7) 2040×2040 (7) 1920×1080 (15) 1280×1024 (15) 640×512 (15) |
| Архитектура | B-NBL- ККТ-EBL-T | B-NiOx- ККТ-C60-ZnO-T | B-TiO ₂ - ККТ -PolyTPD-T | B-BCP-C60- ККТ- MoO ₃ -ITO |
| d _{EBL} (нм) | – | 150 | – | – |
| d _{C60} (нм) | – | 15 | – | – |
| d _{HTL} (нм) | – | 60 | – | – |
| d _{Pbs} (нм) | ~ 120 | ~ 600 | ~ 100 | ~ 100 |
| I _{dark} (А/см ²) | 3,0×10 ⁻⁷ (шаг 5 мкм) 1,5×10 ⁻⁷ (шаг 2,1 мкм) 2,0×10 ⁻⁷ (шаг 1,82 мкм) | 17,8×10 ⁻⁹ | 3,3×10 ⁻⁶ | 1,3×10 ⁻⁷ (293 К) V _{см} = - 25 мВ |
| D* (см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹) | – | 2,1×10 ¹² (λ = 1,1 мкм) | – | 1×10 ¹² (20 °С, 1,4 мкм) 4×10 ¹² (-20 °С, 1,4 мкм) |
| IR EQD (%) | ~ 13 (λ = 1,4 мкм) | ~ 63 (λ = 0,96 мкм) | ~ 40 | ~ 15 (λ = 1,5 мкм) |
| Vis EQD (%) | ~ 35 (λ = 0,43 мкм) | ~ 90 (λ = 0,46 мкм) | ~ 70 | ~ 60 (λ = 0,54 мкм) |
| Положение 1-го экситон. пика (мкм) | 1,4 | 0,97 | 1,45 | 1,49 |
| Диапазон чувств. (мкм) | 0,4÷1,4 | 0,4÷1,3 | 0,4÷1,6 | 0,35÷2,1 0,4÷1,65 |
| Год, Публикация | 2020, [28] | 2022, [17] | 2021, [29] | 2020, [6] |

Примечания: В – Bottom contact (нижний непрозрачный электрод); Т – Top contact (верхний прозрачный электрод); NBL – Hole Blocking Layer (слой, блокирующий поток дырок); EBL – Electron Blocking Layer (слой, блокирующий поток электронов); C60 – фуллерен; ITO – оксид индия-олова (In₂O₃)_{0,9}-(SnO₂)_{0,1}; PolyTPD – поли(4-бутил- N,N'-дифениланилин); BCP – 2,9-диметил-4,7-дифенил-1,10-фенантролин; EQD – квантовая эффективность; D* – обнаружительная способность; I_{dark} – темновой ток.

Анализ представленных в литературе архитектур показывает, что все они обладают общими чертами, а их архитектура имеет следующий вид (рис. 1):

1) нижний электрод (контакт, формируемый непосредственно на поверхности СБИС

считывания, англ. Bottom contact, В). В качестве материала данного электрода в зависимости от энергетической диаграммы структуры используются различные металлы: золото [11, 12], алюминий [13, 14], серебро [15], никель [16];

2) первый барьерный слой. В зависимости от типа архитектуры, данный слой может быть или блокирующим транспорт электронов (англ. Electron Blocking Layer, EBL) или блокирующим транспорт дырок (англ. Hole Blocking Layer, HBL). В литературе данный слой также часто называют транспортным, подчеркивая, что он обеспечивает селективный транспорт носителей только одного типа: дырок (англ. Hole Transport Layer, HTL) или электронов (англ. Electron Transport Layer, ETL). В качестве материала данного слоя используются как оксидные широкозонные полупроводники *n*- или *p*-типа проводимости (*n*-ZnO [17], *n*-TiO₂ [18, 19], *n*-NiO_x [17, 19], *n*-SnO₂ [20], *p*-MoO_x [15, 21],) так и органические полупроводники (*p*-polyTPD (поли(4-бутилфенил)дифениламин) [18], *p*-TAPC (1,1-бис[4-(дитолиламино)фенил]циклогексан) [15]);

3) основной поглощающий слой. Данный слой состоит из коллоидных квантовых точек. Материал и размер квантовых точек определяют спектральный диапазон поглощения, а тип и степень легирования, в том числе за счёт модификации поверхности различными молекулами-лигандами, определяют транспортные характеристики носителей в слое. В качестве материала фоточувствительного слоя в абсолютном большинстве прототипов и серийных матричных фотоприемников используют ККТ PbS [6, 17, 22–24] (табл. 2).

4) второй барьерный слой. Задача второго барьерного слоя блокировать носители противоположные по знаку тем, что блокировались в первом блокирующем слое.

5) верхний прозрачный электрод. В качестве материала верхнего электрода используют материалы, обладающие высокой электропроводностью и высокой прозрачностью в заданном спектральном диапазоне чувствительности прибора. В большинстве случаев в качестве прозрачного электрода в литературе описано использование *n*-ITO ((In₂O₃)_{0,9}-(SnO₂)_{0,1}) [15]. Однако, нужно отметить, что данный материал не является оптимальным для использования в фотоприемниках с длинноволновой границей чувствительности превышающей 1 мкм из-за резкого снижения пропускания [25]. Использование многослойных покрытий совместно с ITO позволяет обеспечить высокое светопропускание (>80 %) вплоть до 2 мкм [26]. Также в литературе описано использование в качестве прозрачного электрода и альтернативных материала-материалов, например, сетчатой структуры из серебряных нанонитей [16].

6) антиотражающий слой (просветляющий). Для повышения ампер-ваттной чувствительности фоточувствительную структуру покрывают слоем, обеспечивающим снижение отражения падающего излучения, состав используемых покрытий в литературе обычно не раскрывается [24, 27].

7) капсулирующий слой. В ряде источников сообщается, что на поверхности верхнего прозрачного электрода дополнительно формируют покрытие, защищающее структуру от воздействий факторов внешней среды [24, 27].

8) микролинзы. Использование микролинз на поверхности также способствует повышению чувствительности [24, 27].

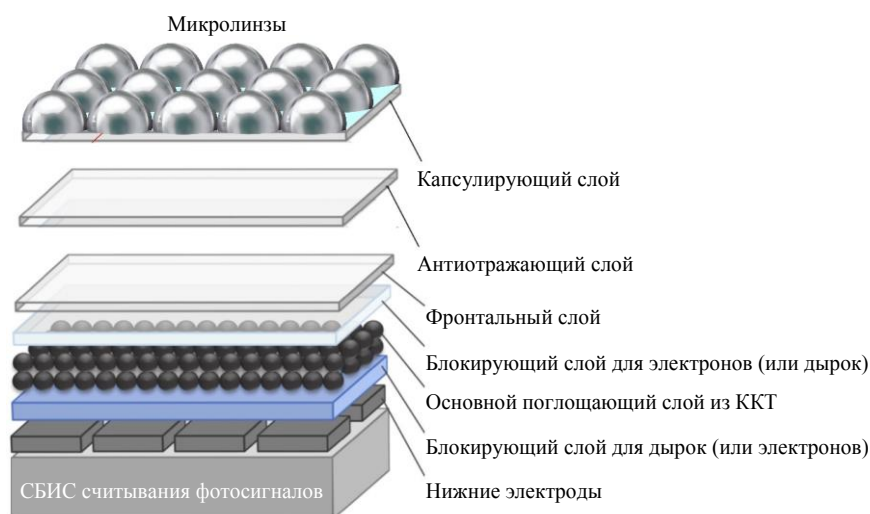


Рис. 1. Схема архитектуры фоточувствительной структуры на основе коллоидных квантовых точек

Микролинзы и антиотражающие слои описаны только в единичных работах [24, 27].

Оригинальная архитектура и подход к формированию верхнего прозрачного электрода приложены в АО «НПО «Орион» и МФТИ [16]. Использование коллоидных кван-

товых точек для двух размеров (3,1 и 7,6 нм), а также применение серебряных нанонитей для формирования прозрачного электрода (рис. 2а) позволило повысить относительную чувствительность в диапазоне от 0,9 до 1,8 мкм (рис. 2б).

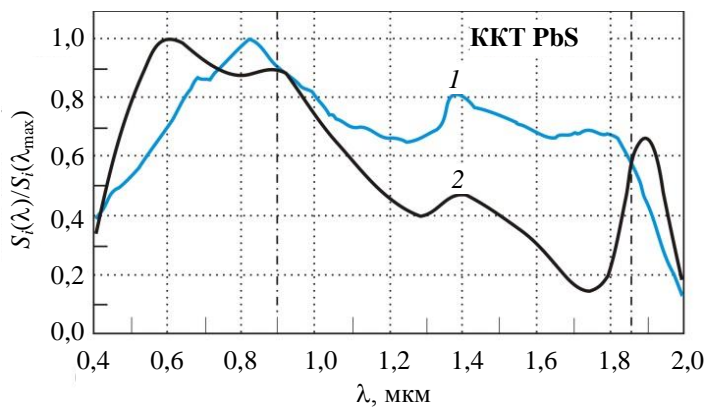
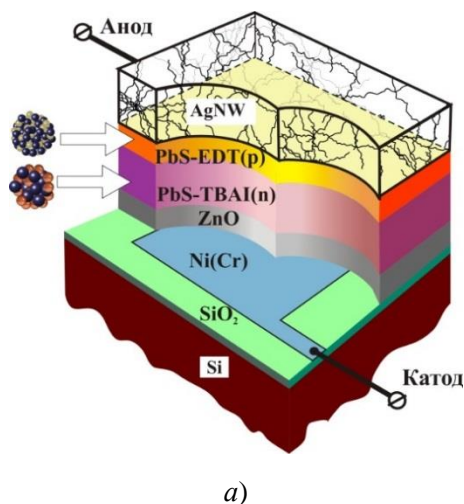


Рис. 2. а) – архитектура фотодиода AgNW/ККТ p-PbS-EDT/ККТ n-PbS-TBAI/Ni/Cr и б) – спектральные зависимости относительной фоточувствительности фотодиода AgNW/ККТ p-PbS-EDT/ККТ n-PbS-TBAI/Ni/Cr (кривая 1) [16] и фотодиода ККТ PbS/C60 на поверхности Si-ROIC (кривая 2) [6, 30]

На сегодняшний момент именно на матричных фотоприемниках на основе фотодиодов из ККТ получены предельные характеристики по удельной обнаружительной способности (2×10^{12} Джонс [17]), шагу элементов (1,62 мкм [24]) и предельному формату (3064×2040 [7]). Стоимость таких матриц для полноформатной (640×512) не корпусированной матрицы составляет 50 евро [9].

2. Развитие фоторезистивных структур фотосенсоров на основе ККТ

На сегодняшний момент среди прототипов матричных фотоприемников на основе ККТ описано два прототипа, основанных на использовании фоточувствительных элементов фоторезистивного типа [8, 31]. Конструкция фотоприемной матрицы выполненной из фоторезисторов имеет более простое устройство, чем было описано выше для матрицы из фотодиодов. Непосредственно на поверхности СБИС-считывания формируются площадки электродов, играющие роль как нижнего контакта, так и отражающего покрытия для повышения поглощения в слое ККТ [31]. В качестве материала ККТ в описанных прототипах используется HgTe [8, 31]. Представленная

конструкция фотоприемной матрицы обладает высокой технологичностью за счёт отсутствия большого числа функциональных слоёв, что по расчётам, приведенным в работе [8], должно привести к заметному снижению стоимости матричного фотоприемника вплоть до 73 евро, из которых стоимость фотоприемной матрицы с СБИС-считывания составила 23 евро, а оставшиеся 50 евро пришлись на стоимость керамического корпуса. Вместе с тем нужно отметить, что описанные прототипы имеют на два порядка меньшую обнаружительную способность и в 2–4 раза более низкую квантовую эффективность чем матричные фотоприемники на фотодиодах из ККТ.

3. Успехи в создании матричных фотоприемников на основе ККТ

Успехи в освоения гибридно-монокристаллической технологии на основе ККТ в 2020–2021 году способствовали повышению интереса к данной технологии целого ряда университетов и промышленных компаний. За последние несколько лет промышленные образцы были представлены уже восемью компаниями из шести стран мира (табл. 2).

Таблица 2

**Состояние с разработкой и производством матричных фотосенсоров
на основе коллоидных квантовых точек**

| Параметр | SWIR Vision | Emberion (Nokia) | IMEC | ST Micro-electronics | New Image Tech | HiSilicon Opto-electronics | Zhongxin-recheng | Quantum Solutions |
|--|--|---------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|--------------------------|
| Шаг, мкм | 7 15 | 20 | 1,82 2,1 5 | <u>1,62</u> 2,2 | 15 | 15 | 15 | 5 |
| Формат (Число элементов) | <u>3064×2040</u> 2040×2040 1920×1080 1280×1024 640×480 | 640×512 | 128×128 768×512 | 0,9 мега- пикс. | 640×512 | 640×512 | 1280×1024 | 640×512 |
| Спектральный диапазон, мкм | <u>0,4÷2,1</u> 0,4÷1,7 | 0,4÷2,0 | 0,4÷1,6 | 0,4÷1,5 | 0,4÷1,8 | 0,4÷1,3 | 0,4÷2,0 | 0,4÷1,7 |
| Материал (тип структуры) | ККТ PbS (ФД) | ККТ PbS (ФД) | ККТ PbS (ФД) | ККТ PbS (ФД) | ККТ HgTe (ФР) | ККТ PbS (ФД) | ККТ HgTe (ФР) | ККТ PbS (ФД) [31] |
| Динамический диапазон, дБ | 70 | <u>120</u> | 82 | 53 | – | 100 | 66 | н/д |
| Частота кадров, кадров в секунду | – | 100 | – | – | 200 <u>350</u> | – | – | 220 |
| D*, см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹ (EQE) (T = 300 К) | 10 ¹² | (20 %) | (40 %) | (60 %) | (15 %) | <u>2×10¹²</u> | 2,8×10 ¹⁰ | н/д |
| Страна | США | Финляндия | Бельгия | Франция | Франция | Китай | Китай | Великобритания |
| Статус образца | серия | серия | прототип | прототип | прототип | прототип | прототип | серия |
| Год первой публикации | 2020 | 2021 | 2020 | 2021 | 2022 | 2022 | 2023 | 2024 |
| Публикация | [6] | [22] | [23, 28] | [24] | [8] | [17] | [31] | [33] |

Примечание: н/д – нет данных.

Продемонстрированные в литературе исследования, посвященные стабильности [24] фотоприемных матриц на основе ККТ к воздействию циклических отрицательных и повышенных положительных температур (–40 °С ÷ +125 °С) и влажности (отн. влажность 85 %, при температуре +110 °С), свидетельствуют о возможности использования данного типа фотосенсоров для широкого спектра применений.

Недавние сообщения ряда компаний свидетельствуют об успешной разработке процесса изготовления ИК-матриц путём формирования слоёв ККТ на поверхности СБИС-

считывания групповым способом на пластинах кремния 200 мм [32] и даже 300 мм [24, 27]. Создание фотоприемных матриц на пластинах такого большого диаметра свидетельствует о готовности к массовому производству гибридно-монолитных ИК-матриц видимого и коротковолнового ИК-диапазона.

4. Перспективы применения матричных фотоприемников на основе ККТ

Существенное снижение стоимости ИК-матриц, имеющих чувствительность как в видимом, так и в коротковолновом ИК-диапазо-

нах (SWIR) совместно с высокими параметрами матриц на коллоидных квантовых точках, открывает возможности широкого применения камер на их основе в различных областях человеческой деятельности, там, где ранее применение ИК-техники ограничивалось высокой ценой аппаратуры.

Использование оптической системы, позволяющей на основе широкоспектральной матрицы осуществлять мультиспектральную съёмку, открывает дополнительные возможности практических применений.

Становится возможным создание широкодоступных инфракрасных систем, в том числе, мультиспектрального технического зрения, анализа и визуализации, которые в настоящее время активно развиваются для применения в новейших технологиях беспилотного автомобильного, железнодорожного, авиационного и других видов транспорта.

Применение ИК-камер для получения, в том числе, мультиспектральных изображений будет востребовано в «умном» сельском и коммунальном хозяйствах для контроля состояния посевов и инспекции зданий и инфраструктуры, в пожарной и лесоохране для контроля очагов возгораний, при переработке отходов, а также иных задач дистанционного зондирования земли с использованием легких летательных и космических аппаратов.

В качестве примера развития указанных направлений можно привести, представленный в 2024 году, образец камеры видимого и коротковолнового ИК-диапазонов (0,4÷1,7 мкм) на основе коллоидных квантовых точек формата 640×512, входящей в состав трехспектрального оптико-электронного модуля со стандартным гиросtabilизированным подвесом для применения на массовых БПЛА легкого класса (рис. 3) [34, 35].



Рис. 3. ИК-камера на основе коллоидных квантовых точек для БПЛА типа DJI Matrice 300 [34, 35]

Заключение

Гибридно-монокристаллические матричные фотоприемники на основе коллоидных квантовых точек активно развиваются в последние несколько лет. На сегодняшний день созданы серийные матрицы и прототипы как на основе фотодиодов, так и на основе фоторезисторов. Предельные характеристики, достигнутые на сегодняшний момент в приборах на ККТ различных фирм по удельной обнаружительной способности, шагу элементов, предельному формату составляют 2×10^{12} см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹ (в диапазоне 0,4÷1,3 мкм), 1,62 мкм и 3064×2040, соответственно. Стоимость таких матриц для полноформатной не корпусированной матрицы достигает от 23 до 50 евро. Совокупность вышеприведённых параметров, является трудно достижимой для классической гибридной технологии и открывает возможности применения матриц из ККТ в различных сферах. Подтверждением этого может служить описанная выше камера в составе многоспектрального подвеса для массового легкого беспилотного летательного аппарата.

*Работа выполнена при поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации в рамках соглашения
№ 075-03-2024-117 от 17.01.2024 г.
(проект № FSMG-2022-0034).*

ЛИТЕРАТУРА

1. Пономаренко В. П., Попов В. С., Попов С. В. / Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. С. 25–67. doi: 10.51368/2307-4469-2021-9-1-25-67
2. Попов В. С., Пономаренко В. П., Попов С. В. / Прикладная физика. 2023. № 6. С. 45–53. doi: 10.51368/1996-0948-2023-6-45-53
3. Пономаренко В. П., Попов В. С., Шуклов И. А. et al. / Успехи химии. 2024. Т. 93. С. RCR5113. doi: 10.59761/RCR5113
4. Caillas A., Guyot-Sionnest P. / ACS Nano. 2024. Vol. 18. P. 8952–8960. doi: 10.1021/acsnano.3c12581
5. Xue X., Hao Q., Chen M. / Light Sci Appl. 2024. Vol. 13:89. doi: 10.1038/s41377-024-01436-y
6. (2023) Acuros SWIR VISION. <https://www.swirvisionsystems.com/acuros-swir-camera/>.
7. (2024) SWIR VISION Acuros® GO. <https://www.swirvisionsystems.com/acuros-go-camera/>.
8. Gréboval C., Darson D., Parahyba V. et al. / Nanoscale. 2022. Vol. 14. P. 9359–9368. doi: 10.1039/D2NR01313D

9. (2024) Emberion Oy Introduces Groundbreaking Ultra Low-Cost SWIR Sensor. In: Emberion Oy. <https://www.emberion.com/emberion-oy-introduces-groundbreaking-ultra-low-cost-swir-sensor/>.
10. (2023) About. SWIR Vision Systems. <https://www.swirvisionsystems.com/about/>.
11. Jagtap A., Goubet N., Livache C. et al. / J. Phys. Chem. C. 2018. Vol. 122. P. 14979–14985. doi: 10.1021/acs.jpcc.8b03276
12. Tang X., Ackerman M. M., Guyot-Sionnest P. / ACS Nano. 2018. Vol. 12. P. 7362–7370. doi: 10.1021/acsnano.8b03871
13. Dong R., Bi C., Dong Q. et al. / Adv Opt Mater. 2014. Vol. 2. P. 549–554. doi: 10.1002/adom.201400023
14. Clifford J. P., Konstantatos G., Johnston K. W. et al. / Nat Nanotechnol. 2009. Vol. 4. P. 40–44. doi: 10.1038/nnano.2008.313
15. Lee J. W., Kim D. Y., So F. / Adv Funct Mater. 2015. Vol. 25. P. 1233–1238. doi: 10.1002/adfm.201403673
16. Попов В. С., Пономаренков В. П., Демкин Д. В. и др. / Доклады Российской академии наук Физика, технические науки. 2023. Т. 511. С. 78–82. doi: 10.31857/S2686740023040120
17. Liu J., Liu P., Chen D. et al. / Nat Electron. 2022. Vol. 5. P. 443–451. doi: 10.1038/s41928-022-00779-x
18. Georgitzikis E., Malinowski P. E., Li Y. et al. / IEEE Sens J. 2020. Vol. 20. P. 6841–6848. doi: 10.1109/JSEN.2019.2933741
19. Leemans J., Pejović V., Georgitzikis E. et al. / Adv Sci. 2020. Vol. 9. P. 1–8. doi: 10.1002/advs.202200844
20. Gong W., Wang P., Deng W. et al. / IEEE Trans Electron Devices. 2023. Vol. 70. P. 3668–3674. doi: 10.1109/TED.2023.3276730
21. Klem E. J. D., Gregory C. W., Cunningham G. B. et al. / Appl. Phys. Lett. 2012. doi: 10.1063/1.4707377
22. (2023) Emberion VS20 Vis-SWIR Camera Series. <https://www.emberion.com/products/vs20-vis-swir-camera/>.
23. Malinowski P., Pejovic V., Bentell J. et al. / AMA Service GmbH. 2023. P. 121–122
24. Steckel J. S., Josse E., Pattantyus-Abraham A. G. et al. / IEEE Int. Electron Devices Meet. IEEE. 2021. P. 23.4.1–23.4.4.
25. Al-Kuhaili M. F. / J. Mater. Sci. Mater Electron. 2020. Vol. 31. P. 2729–2740. doi: 10.1007/s10854-019-02813-9
26. Zhou C., Zhou H., He Y. et al. / Trans. Tianjin Univ. 2019. Vol. 25. P. 195–200. doi: 10.1007/s12209-018-0153-7
27. Steckel J. S., Arnaud J., Pattantyus-Abraham A. G. et al. Colloidal Quantum Dot Image Sensor Technology. B: Int. Conf. Compd. Semicond. Manuf. Technol. – Orlando. 2023. P. 6–9.
28. Lee J., Georgitzikis E., Li Y. et al. / IEEE Int. Electron Devices Meet. IEEE, 2020. P. 16.5.1–16.5.4.
29. Pejovic V., Lee J., Georgitzikis E. et al. / IEEE Electron Device Lett. 2021. Vol. 42. P. 1196–1199. doi: 10.1109/LED.2021.3093081
30. Hinds S., Klem E., Gregory C. et al. / Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications. 2020. Vol. XLVI. P. 8.
31. Luo Y., Tan Y., Bi C. et al. / APL Photonics. 2023. doi: 10.1063/5.0145374
32. (2024) 200 mm wafer level processing of QDot™ quantum dot n-type ink. In: Quantum Solut. <https://quantum-solutions.com/news/wafer-level-processing-of-qdot-quantum-dot-n-type-ink/>.
33. Cam TQ, Dot Q (2024) Q . Cam™ SWIR Camera. Quantum Solut 0–3.
34. (2024) Q . Fly™ Camera. In: Quantum Solut. <https://quantum-solutions.com/product/q-fly-camera/>.
35. (2024) Topodrone and Quantum Solutions announce collaboration on next generation Vis-SWIR camera. In: Topodrone. <https://topodrone.com/company/news/1479/>.

PACS: 85, 85.60.–q

Infrared photosensorics based on hybrid monolithic arrays on quantum dots

V. S. Popov^{1,2}, V. P. Ponomarenko^{1,2}, A. I. Dirochka¹ and S. V. Popov^{3,4}

¹ Orion R&P Association

9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia

² Moscow Physical and Technical Institute (MIPT)

9 Institutskii al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

³ Shvabe Holding

176 Prospekt Mira, Moscow, 129366, Russia

⁴ Peoples' Friendship University of Russia

3 Ordzhonikidze, Moscow, 115419, Russia

Received 12.11.2024; revised 29.11.2024; accepted 12.12.2024

Hybrid monolithic IR arrays based on colloidal quantum dots (CQD) have been actively developing in the last few years. The dynamics of development and the parameters achieved to date

in terms of pitch, maximum format and low cost allow us to say that this direction can ensure the mass distribution of IR cameras of this type in various areas where the use of classic hybrid arrays photodetectors was unavailable. The article is devoted to the basic issues of constructing such arrays, analyzing advanced achievements in this area and forecasting possible applications that are opening up for IR photosensors based on CQD.

Keywords: photosensor; IR array; colloidal quantum dots; CQD; hybrid monolithic array.

REFERENCES

1. Ponomarenko V. P., Popov V. S. and Popov S. V., J. Commun. Technol. Electron **67**, S1–S36 (2022). doi: 10.1134/S106422692213006X 7
2. Popov V. S., Ponomarenko V. P. and Popov S. V., Applied Physics, № 6, 45–53 (2023) [in Russian]. doi: 10.51368/1996-0948-2023-6-45-53
3. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A. et al., Russ. Chem. Rev. **93**, RCR5113 (2024). doi: 10.59761/RCR5113
4. Caillas A. and Guyot-Sionnest P., ACS Nano **18**, 8952–8960 (2024). doi: 10.1021/acsnano.3c12581
5. Xue X., Hao Q. and Chen M., Light. Sci. Appl. **13**, 89 (2024). doi: 10.1038/s41377-024-01436-y
6. (2023) Acuros SWIR VISION. <https://www.swirvisionsystems.com/acuros-swir-camera/>.
7. (2024) SWIR VISION Acuros® GO. <https://www.swirvisionsystems.com/acuros-go-camera/>.
8. Gréboval C., Darson D., Parahyba V. et al., Nanoscale **14**, 9359–9368 (2022). doi: 10.1039/D2NR01313D
9. (2024) Emberion Oy Introduces Groundbreaking Ultra Low-Cost SWIR Sensor. In: Emberion Oy. <https://www.emberion.com/emberion-oy-introduces-groundbreaking-ultra-low-cost-swir-sensor/>.
10. (2023) About. SWIR Vision Systems. <https://www.swirvisionsystems.com/about/>.
11. Jagtap A., Goubet N., Livache C. et al., J. Phys. Chem. C **122**, 14979–14985 (2018). doi: 10.1021/acs.jpcc.8b03276
12. Tang X., Ackerman M. M. and Guyot-Sionnest P., ACS Nano **12**, 7362–7370 (2018). doi: 10.1021/acsnano.8b03871
13. Dong R., Bi C., Dong Q. et al., Adv. Opt. Mater. **2**, 549–554 (2014). doi: 10.1002/adom.201400023
14. Clifford J. P., Konstantatos G., Johnston K. W. et al., Nat. Nanotechnol. **4**, 40–44 (2009). doi: 10.1038/nnano.2008.313
15. Lee J. W., Kim D. Y. and So F., Adv. Funct. Mater. **25**, 1233–1238 (2015). doi: 10.1002/adfm.201403673
16. Popov V. S., Ponomarenko V. P., Dymkin D. V. et al., Dokl. Phys. **68**, 233–236 (2023). doi: 10.1134/S1028335823070066
17. Liu J., Liu P., Chen D. et al., Nat. Electron. **5**, 443–451 (2022). doi: 10.1038/s41928-022-00779-x
18. Georgitzikis E., Malinowski P. E., Li Y. et al., IEEE Sens. J. **20**, 6841–6848 (2020). doi: 10.1109/JSEN.2019.2933741
19. Leemans J., Pejović V., Georgitzikis E. et al., Adv. Sci. **9**, 1–8 (2022). doi: 10.1002/advs.202200844
20. Gong W., Wang P., Deng W. et al., IEEE Trans Electron Devices **70**, 3668–3674 (2023). doi: 10.1109/TED.2023.3276730
21. Klem E. J. D., Gregory C. W., Cunningham G. B. et al., Appl. Phys. Lett. (2012). doi: 10.1063/1.4707377
22. (2023) Emberion VS20 Vis-SWIR Camera Series. <https://www.emberion.com/products/vs20-vis-swir-camera/>.
23. Malinowski P., Pejovic V., Bentell J. et al., AMA Service GmbH 121–122 (2023).
24. Steckel J. S., Josse E., Pattantyus-Abraham A. G. et al., IEEE Int. Electron Devices Meet. IEEE 23.4.1–23.4.4 (2021).
25. Al-Kuhaili M. F., J. Mater. Sci. Mater. Electron. **31**, 2729–2740 (2020). doi: 10.1007/s10854-019-02813-9
26. Zhou C., Zhou H., He Y. et al., Trans Tianjin Univ. **25**, 195–200 (2019). doi: 10.1007/s12209-018-0153-7
27. Steckel J. S., Arnaud J., Pattantyus-Abraham A. G. et al. Colloidal Quantum Dot Image Sensor Technology. B: Int. Conf. Compd. Semicond. Manuf. Technol. Orlando, 2023, pp. 6–9.
28. Lee J., Georgitzikis E., Li Y. et al., IEEE Int. Electron Devices Meet. IEEE 16.5.1–16.5.4 (2020).
29. Pejovic V., Lee J., Georgitzikis E. et al., IEEE Electron. Device. Lett. **42**, 1196–1199 (2021). doi: 10.1109/LED.2021.3093081
30. Hinds S., Klem E., Gregory C. et al. Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications, 2020, Vol. XLVI, p. 8.
31. Luo Y., Tan Y., Bi C. et al., APL Photonics (2023). doi: 10.1063/5.0145374
32. (2024) 200 mm wafer level processing of QDot™ quantum dot n-type ink. In: Quantum Solut. <https://quantum-solutions.com/news/wafer-level-processing-of-qdot-quantum-dot-n-type-ink/>.
33. Cam TQ, Dot Q (2024) Q . Cam™ SWIR Camera. Quantum Solut 0–3.
34. (2024) Q . Fly™ Camera. In: Quantum Solut. <https://quantum-solutions.com/product/q-fly-camera/>.
35. (2024) Topodrone and Quantum Solutions announce collaboration on next generation Vis-SWIR camera. In: Topodrone. <https://topodrone.com/company/news/1479/>.