

УДК 621

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-45-53

EDN: NQIUO

PACS: 81.07.-t, 81.10.-b



## Гибридно-монокристалльные ИК-матрицы на основе коллоидных квантовых точек и 2D-материалов

В. С. Попов, В. П. Пономаренко, С. В. Попов

*В последние несколько лет активно развивается технология гибридно-монокристалльных матриц на основе коллоидных квантовых точек, которая позволит существенно снизить стоимость фотоприемных устройств. В работе проведен обзор передовых достижений в области создания матричных фотоприемников на основе коллоидных квантовых точек и 2D-материалов, приведены параметры серийно выпускаемых матричных фотоприемников и прототипов.*

*Ключевые слова:* фотосенсор, ИК-матрицы, коллоидные квантовые точки, ККТ, графен.

### Введение

Основными трендами развития инфракрасных матричных фотоприемников в настоящее время являются: многоспектральность; повышенные рабочие температуры, вплоть до комнатной; снижение массогабаритных характеристик; снижение потребляемой мощности; снижение стоимости [1, 2].

Ключевыми особенностями современных решений по созданию матриц на основе

бинарных соединений и твердых растворов  $A^3B^5$  (InSb, InGaAs и др.) и  $A^2B^6$  (CdHgTe) для коротковолнового, средневолнового и длинноволнового ИК-диапазонов являются: высокие производственные затраты; сложность воспроизводимого получения материала с заданными характеристиками; необходимость интеграции с кремниевой электроникой, требующая сложных технологических приемов с использованием индиевых микроконтактов; высокие массогабаритные характеристики, обусловленные наличием криогенных систем охлаждения (для MWIR и LWIR) [2].

В последние несколько лет в технологиях ИК-фотосенсорике наблюдаются революционные процессы внедрения нового материала – коллоидных квантовых точек (ККТ) – для изготовления матричных фотоприемников. На рынке в 2019 году были представлены первые серийные камеры коротковолнового инфракрасного диапазона на основе матричных фотоприемников, использующие в качестве фоточувствительных слоев коллоидные квантовые точки [3, 4].

Эффект размерного квантования в полупроводниковых нанодисперсных кристаллах хлорида меди (CuCl) в матрице из стекла был экспериментально открыт в СССР в 1981 г. (А. И. Екимов, А. А. Онущенко; ГОИ им. С. И. Вавилова) [5] и получил объяснение в

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

E-mail: popov.vs@mipt.ru

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

**Попов Сергей Викторович**<sup>3,4</sup>, зам. ген. директора, зав. кафедрой, доцент, д.т.н.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, Косинская, 9.

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

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

<sup>3</sup> АО «Швабе».

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

<sup>4</sup> Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы.

Россия, 115419, Москва, Орджоникидзе, 3.

Статья поступила в редакцию 9.11.2023

После доработки 20.11.2023

Принята к публикации 24.11.2023

1985 г. (А. И. Екимов, А. А. Онущенко, Ал. Л. Эфрос; ГОИ им. С. И. Вавилова, ФТИ им. А. Ф. Иоффе) [6], в коллоидных нанокристаллах в сульфида кадмия в США в 1983 году (R. Rossetti, S. Nakahara, L. E. Brus; Bell Laboratories) [7]. Наибольшего развития прикладное применение коллоидных квантовых точек достигло после разработки метода их синтеза, обеспечивавшего простоту и удобство получения суспензий с узким распределением наночастиц по размерам [8]. В 2023 году Алексею Екимову, Льюису Брюсу и Мунги Бовенди была присуждена Нобелевская премия по химии за открытие и синтез квантовых точек.

В настоящее время наиболее массовое применение коллоидных квантовых точек в электронике реализовано в сфере светоизлу-

чающих устройств, где ККТ используются в качестве люминофоров. Квантово-размерный эффект позволяет, используя один и тот же материал, за счёт варьирования размеров ККТ получать слои, светоизлучающие в разных частях видимого диапазона для формирования цветного изображения. А благодаря узким и воспроизводимым положениям пиков люминесценции и высокому квантовому выходу люминесценции, получаемых химически ККТ, удается формировать яркое и контрастное изображение [9].

Аналогично размерной зависимости спектров люминесценции, зависимость спектров поглощения ККТ от их размера даёт возможность создания фоточувствительных элементов на основе слоёв ККТ с заданным диапазоном поглощения (рис. 1) [10, 11].

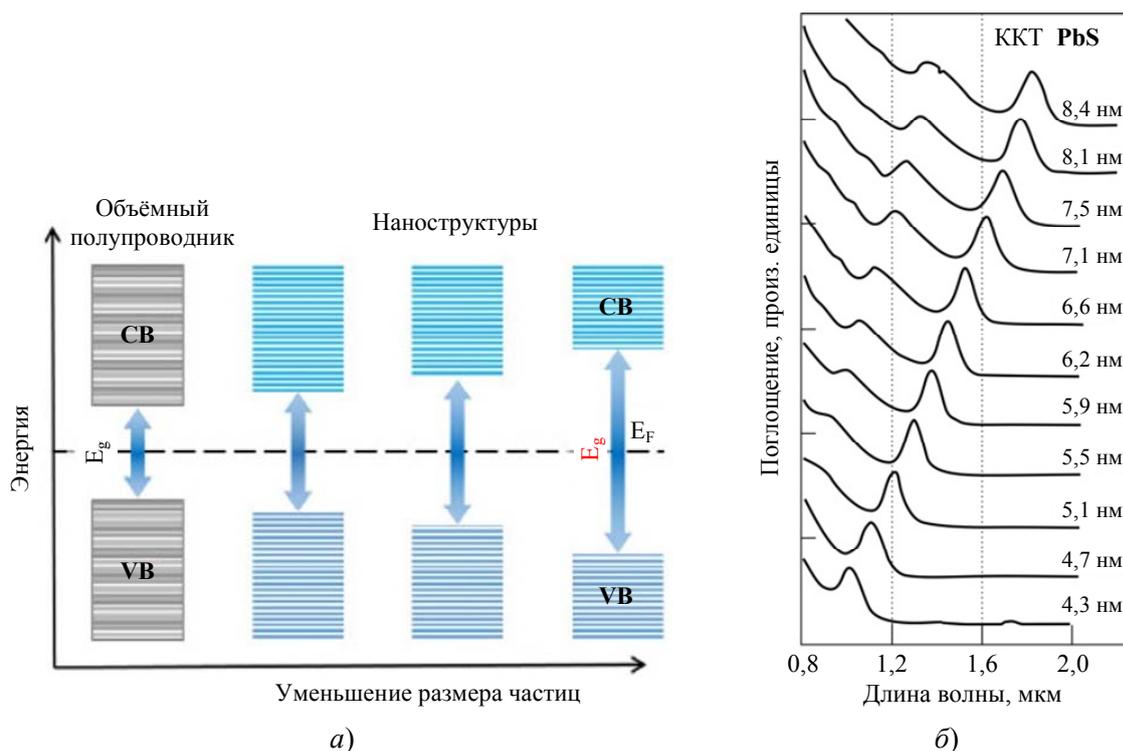


Рис. 1. а) – схема зависимости ширины запрещенной зоны ККТ от их размера; б) – спектральная зависимость поглощения ККТ от их размера [10]

Возможность формирования фоточувствительной структуры путем непосредственного нанесения слоёв ККТ на поверхность СБИС считывания, выполненной по стандартной КМОП технологии, приводит к коренным изменениям в технологии создания матричных фотоприемников ИК-диапазона [12].

## 1. Преимущества технологии создания фотоприемников на основе ККТ

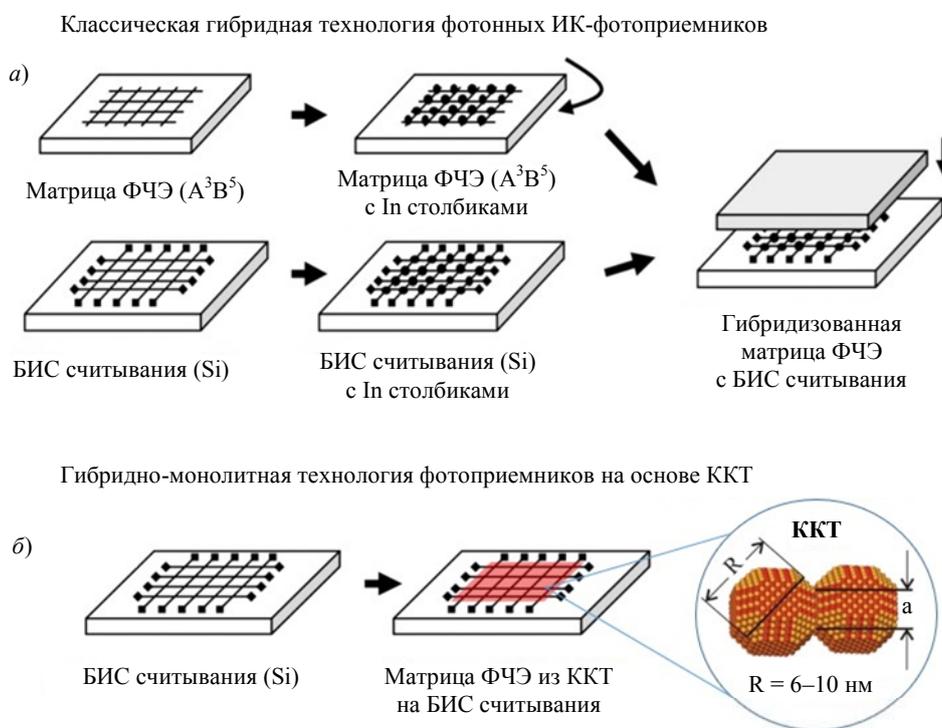
Классические процессы изготовления матричных ИК-фотоприемников включают операции объединения (гибридизации) матрицы фоточувствительных элементов (с энер-

гетическим барьером, обычно, на основе  $p-n$ -перехода или на основе гетероперехода) и матричной кремниевой СБИС считывания и предварительной обработки фотосигналов при помощи термокомпрессии с применением малоразмерных индиевых микроконтактов [13]. Эти операции являются ключевыми для всей современной матричной фотосенсорике (рис. 2а). Вместе с тем, они достаточно трудоемки, дефекты гибридизации существенно влияют на качество матричных фотосенсоров, а размер индиевых микроконтактов не удается сделать менее 3–5 мкм, что ограничивает шаг фоточувствительных элементов в матрицах, снижая их пространственную разрешающую способность, и в конечном итоге приводит к высокой стоимости приборов.

Создание фотоприемных устройств на основе ККТ основано на подходах, существенно отличающихся от принципов создания фотоприемных матриц на основе монокристаллических и эпитаксиальных полупроводников и полупроводниковых структур. Предложенная несколько лет назад концепция гибридно-монокристаллической (рис. 2б) технологии

изготовления матриц заключается в формировании фоточувствительной структуры непосредственно на поверхности СБИС считывания, путем поочередного нанесения суспензий наночастиц с целью формирования транспортных слоёв и фоточувствительных слоёв из коллоидных квантовых точек техниками спинкоатинга или методами печатной электроники с использованием так называемых чернил, т. е. суспензий с заданной вязкостью, содержащих ККТ и не требующих дополнительной постобработки. Благодаря применению ККТ становится возможным исключить при изготовлении наиболее сложные операции изготовления и снять ограничения на пространственную разрешающую способность, благодаря отказу от индиевых микроконтактов [7].

Описанное упрощение технологии приводит к снятию критически важных ограничений по шагу чувствительных элементов, в результате чего шаг матрицы ограничивается только дифракционным пределом и шагом СБИС считывания, который определяется схемотехникой ячейки считывания и топологической нормой КМОП технологии.



**Рис. 2. Основные этапы классической гибридной (а) и гибридно-монокристаллической (б) технологии создания матричных фотоприемных устройств ИК-диапазона [12]**

Переход к такой гибридно-монокристаллической технологии существенно снижает стоимость матричных фотоприемников ИК-диапазона, которая по оценкам работы [14] сможет достигнуть величины менее 100 евро за полноформатную матрицу, выполненную по такой технологии, что в среднем в 10–15 раз ниже стоимости матриц аналогичного формата выполненных по гибридной технологии.

Абсолютное большинство работ в этой области сфокусировано на структурах на основе ККТ PbS и гораздо меньший объем посвящен ККТ HgTe [11]. Прорабатывается возможность использования барьерных структур на основе материалов  $A^3B^5$ , в частности In(As,P) [15].

## 2. Состояние с разработкой и производством фотоприемников на основе ККТ

За последние несколько лет в области создания матричных фотоприемников видимого и коротковолнового ИК-диапазонов достигнуты серьезные успехи. Сегодня на рынке оптоэлектроники представлены две компании – SWIR VISION (США) и Emberion (Финляндия, Великобритания) – серийно выпускающие широкоспектральные (от видимого до коротковолнового ИК-диапазона) камеры на основе матричных фотоприемных устройств собственной разработки, выполненных по гибридно-монокристаллической технологии с использованием ККТ.

Таблица 1

Характеристики матриц на основе ККТ

Параметр	SWIR VISION	Emberion (Nokia)	IMEC	ST Microelectronics	New Image Tech	HiSilicon Optoelectronics	Zhongxinrecheng
Шаг, мкм	15	20	5	$\frac{1,62}{2,2}$	15	15	15
Формат	$1920 \times 1080$ , $1280 \times 1024$ , $640 \times 480$	$640 \times 512$	$768 \times 512$	0,9 мега- пикс	$640 \times 512$	$640 \times 512$	$1280 \times 1024$
Спектральный диапазон, мкм	$\frac{0,4 \div 2,0}{0,4 \div 1,7}$	$0,4 \div 2,0$	$0,4 \div 1,6$	$0,4 \div 1,5$	$0,4 \div 1,8$	$0,4 \div 1,3$	$0,4 \div 2,0$
Материал (тип структуры)	PbS ККТ (ФД)	PbS ККТ (ФД)	PbS ККТ (ФД)	PbS ККТ (ФД)	HgTe ККТ (ФР)	PbS ККТ (ФД)	HgTe ККТ (ФР)
Динамический диапазон, дБ	70	<u>120</u>	82	53	–	100	66
Частота кадров, кадров в секунду	–	100	–	–	$\frac{200}{(350)}$	–	–
$D^*$ , Джонс (EQE) ( $T = 300$ К)	$10^{12}$	(20 %)	(40 %)	<u>(60 %)</u>	(15 %)	$2 \times 10^{12}$	$2,8 \times 10^{10}$
Страна	США	Финляндия	Бельгия	Франция	Франция	Китай	Китай
Тип образца	серия	серия	прототип	прототип	прототип	прототип	прототип
Год	2020	2021	2020	2021	2022	2022	2023
Публикация	[3]	[4]	[16]	[17]	[14]	[18]	[19]

Первая из этих компаний является пионером промышленного освоения технологии гибридно-монокристаллических ИК-матриц на основе ККТ. SWIR VISION создана в 2018 году, как дочерняя компания фирмы RTI International, для коммерциализации разработок в области фотосенсорных матриц на основе ККТ, активно финансировавшаяся DARPA [20]. В 2020 году компанией были представлены первые образцы камер на основе фотоприемных матриц на ККТ, что произвело революцию в ИК индустрии, поскольку представленные образцы не только были основаны на принципиально новой технологии, обеспечивающей существенное снижение стоимости, но и имели параметры, не уступающие характеристикам приборов на основе твердых растворов InGaAs. На сегодняшний день продуктовая линейка содержит 12 моделей камер на основе трёх вариантов матриц на ККТ (табл. 1), в том числе 6 моделей камер для исследования профиля пятна лазерной засветки [3]. Кроме того, в работах [20, 22] были представлены результаты сравнения серийной камеры на основе InGaAs и серийной камеры SWIR VISION Acuros на ККТ в части детектирования лазерного излучения с длиной волны 1064 нм и 1550 нм, показавшие высокое быстродействие ( $< 3$  нс) последней и продемонстрировавшие преимущества широкоспектрального детектирования, что открывает возможности создания лидарных систем, 3D-камер и обнаружителей лазерного излучения на основе матричных фотоприемников на ККТ.

Вторая, из упомянутых выше, компания Emberion была первоначально организована в 2016 году на базе компании Nokia, для создания и коммерциализации фотоприемников на основе графена [23], однако впоследствии фокус компании сместился в сторону совместного использования ККТ как светопоглощающего слоя и графена в качестве канала с высокой подвижностью носителей. В 2021 году компанией Emberion была представлена такая камера формата  $640 \times 512$  с шагом 20 мкм на спектральный диапазон  $0,4 \div 2,0$  мкм на основе ККТ и графена [24]. На сегодняшний день компания предлагает две камеры на основе идентичных фотоприемных матриц на ККТ (табл. 1), отличающиеся только интерфейсом выходного сигнала [4].

Кроме указанных двух компаний, предлагающих серийные камеры на основе матриц на ККТ, за последние 3 года ещё пять компаний продемонстрировали прототипы матричных фотоприемников на ККТ чувствительных от видимого до SWIR-диапазона, а также камеры на их основе (табл. 1).

Большой объём работ по матрицам на основе ККТ проведен в последние несколько лет компанией IMEC (Бельгия) [16, 25–29]. Данной компанией в 2020 году реализован рекордный на тот момент для матриц SWIR-диапазона шаг 1,82 мкм (формат  $128 \times 128$ ) [29]. В 2023 году представлена камера на основе матрицы формата  $768 \times 512$  с шагом 5 мкм на ККТ [16].

Превзойти результаты IMEC и достигнуть значение шага 1,62 мкм, предельное для SWIR матриц удалось в 2021 году компании ST Microelectronics (Франция, США, Тайвань) в матричном фотоприемнике чувствительном в диапазоне  $0,4 \div 1,5$  мкм [17]. Этой же компанией проводятся работы по масштабированию технологии формирования фоточувствительных структур непосредственно на пластине диаметром 300 мм [17], что при положительном результате позволит массово изготавливать матрицы чувствительные в SWIR-диапазоне групповым методом [30]. Немаловажным фактором обеспечивающим широкое внедрение технологии гибридно-монокристаллических ИК-матриц на основе ККТ является подтверждение достаточной стабильности параметров и устойчивости фотоприемников на ККТ к воздействию различных условий эксплуатации, данные о такого рода испытаниях приводятся в работе [17] (табл. 2).

В 2022 году результаты работ по созданию матричного фотоприемника на спектральный диапазон  $0,4 \div 1,8$  мкм на основе ККТ теллурида ртути продемонстрировала исследовательский коллектив из ряда французских университетов и промышленного партнера, компании New Image Tech [14]. Проведенный в работе анализ технологии изготовления позволил рассчитать стоимость матричного фотоприемника, составившую 73 евро (включая стоимость СБИС считывания).

Таблица 2

**Результаты испытаний фотоприемников на ККТ при различных условиях эксплуатации [17]**

Тип испытаний	Значение параметров	Наработка
Стабильность при повышенной температуре	+ 125 °С, сухой воздух	Более 400 ч
Повышенная температура и влажность	+ 85 °С, отн. влажность 85 %	Более 500 ч
Термоциклирование	-40 °С ÷ +125 °С	Более 500 циклов
uHAST тест	+ 110 °С, отн. влажность 85 %	Более 60 ч
HTOL – работоспособность при повышенной температуре (темновая)	+ 70 °С	Более 1600 ч
HTOL – работоспособность при повышенной температуре (при засветке 0,1 Вт/м <sup>2</sup> )	+ 70 °С	Более 500 ч

Развитие данной тематики коллективами из Китая привело к появлению двух прототипов матричных фотоприемников на диапазон 0,4 ÷ 1,3 мкм на основе фотодиодов на ККТ PbS [18] и на основе фоторезисторов на основе ККТ HgTe для области спектра 0,4 ÷ 2,0 мкм [19]. Матричный приемник на основе ККТ появился как продукт на сайте компании Zhongxinrecheng Science and Technology Co., ltd. (Китай) [31].

### 3. Архитектура матричных фоточувствительных элементов на основе ККТ

Архитектура большинства барьерных структур на основе ККТ включает последовательно формируемые на поверхности СБИС считывания транспортные слои *n*- и *p*-типов проводимости, фоточувствительные слои из ККТ, формирующие гетеропереход, слой прозрачного электрода, капсулирующие слои (рис. 3а).

Электронные (ETL) и дырочные (HTL) транспортные слои, являясь барьерными для противоположных типов носителей, предназначены для повышения эффективности разделения носителей заряда и снижения темнового тока. В качестве транспортных слоёв, как правило, применяются оксидные широкозонные полупроводники *n*- или *p*-типа проводимости, такие как оксид цинка (ZnO) [18], оксид никеля (NiO<sub>x</sub>) [15, 18], диоксид олова (SnO<sub>2</sub>), оксид молибдена (MoO) [32] и диоксид титана (TiO<sub>2</sub>) [15, 27] или органические материалы такие как, например, поли(4-бутилфенил-дифениламин) (polyTPD) [27].

Фоточувствительные слои из коллоидных точек *n*- и *p*-типа одного или отличающихся размеров формируют энергетический барьер и непосредственно поглощают фотоны падающего излучения. Для создания энергетического барьера слой ККТ может покрываться слоем фуллерена (рис. 3з) [18, 33] или непосредственно транспортным слоем с противоположным типом носителей (рис. 3б) [27].

Для повышения эффективности работы структуры её могут дополнять антиотражающими (просветляющими) покрытиями, формировать систему микролинз непосредственно на поверхности матрицы фоточувствительных элементов (рис. 3в) [17].

Для повышения быстродействия фоточувствительных элементов на ККТ компанией IMEC предложено использование слоёв графена, как материала с высокой подвижностью носителей [34].

Большинство проводимых в настоящее время исследований по фоточувствительным структурам на основе ККТ направлено на поиск новых архитектур [35, 36], методов модификации поверхности ККТ [36, 37] с целью повышения квантовой эффективности, быстродействия, обнаружительной способности, улучшения спектральной характеристики.

В России работы по созданию фотоприемников на основе ККТ ведутся в АО «НПО «Орион» и МФТИ [38–40], где в настоящее время достигнуты успехи по значительному повышению относительной спектральной чувствительности в диапазоне 0,8÷1,9 мкм [40].

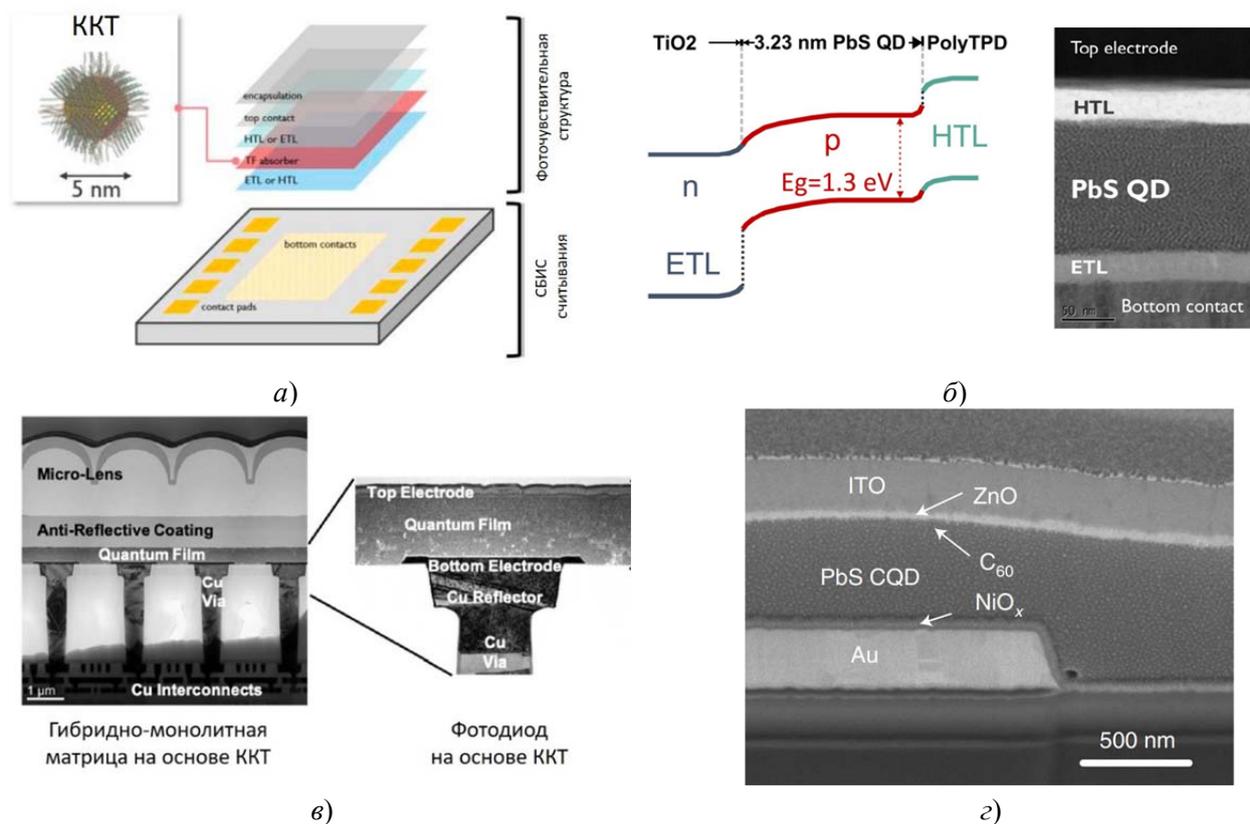


Рис. 3. а) – архитектура фоточувствительной структуры на основе ККТ [16]; б) – зонная диаграмма (слева) поперечное сечение (справа) фоточувствительной структуры компании IMEC [27]; в) – поперечное сечение фоточувствительной структуры с интегрированными микролинзами компании ST Microelectronics [17]; г) – поперечное сечение фоточувствительной структуры, изготовленной с участием компании HiSilicon Optoelectronics [18]

Что касается матричных фотоприемников на средневолновый ИК-диапазон, в 2018 году коллективом из США был продемонстрирован прототип матричной структуры на основе ККТ HgTe 328×256 с шагом 30 мкм и обнаружительной способностью  $10^{10}$  Джонс при 220 К в диапазоне 3 ÷ 5 мкм [41]. В 2023 году в работе [42] продемонстрирована двухдиапазонная (SWIR-MWIR) матрица формата 328×256 из ККТ HgTe имеющая в средневолновом диапазоне ( $\lambda_{гр} = 5,5$  мкм) обнаружительную способность на уровне  $8 \times 10^{10}$  Джонс при 80 К, работа проведена при участии упоминавшийся выше компании Zhongxinrecheng Science and Technology Co. Компания Emberion хотя и упоминает на своем сайте о проведении работ в части разработки фотоприемников на спектральный диапазон 3 ÷ 5 мкм [4], в том числе на основе квантовых точек, однако каких-либо конкретных результатов этих работ на сегодняшний момент не представлено. В РФ работы по данному направлению ведутся МФТИ и АО «НПО «Орион» [43].

### Заключение

В течение последних нескольких лет началось стремительное развитие нового направления фотоэлектроники – матричных фотоприемников на основе коллоидных квантовых точек, что подтверждается созданием серийных образцов матричных фотоприемных устройств и камер на их основе, выполненных по гибридно-монокристаллической технологии на основе ККТ.

Параметры МФПУ SWIR-диапазона на основе коллоидных квантовых точек не уступают аналогам, выполненным по классической гибридной технологии из InGaAs, и превосходят по минимальному шагу элементов (1,62 мкм). Число элементов в серийных образцах достигает 1920×1080 при шаге 15 мкм.

Активно ведутся работы, направленные на поиск новых функциональных наноматериалов, способов их модификации, новых архитектур и конструктивных решений, позволяющих улучшить параметры и существенно расширить области применения камер SWIR-диапазона.

Работа выполнена при поддержке  
Министерства науки и высшего образования  
Российской Федерации в рамках соглашения  
№ 075-03-2023-106 от 13.01.2023 г.  
(проект № FSMG-2022-0034).

## REFERENCES

1. Rogalski A., Kopytko M., Hu W., Martyniuk. P. Infrared HOT Photodetectors: Status and Outlook / *Sensors* **23**, 7564 (2023). <https://doi.org/10.3390/s23177564>
2. Rogalski A. Infrared and Terahertz Detectors, Third Edition. CRC Press, 2019.
3. Acuros SWIR VISION. 2023. <https://www.swirvisionsystems.com/acuros-swir-camera/>
4. Emberion VS20 Vis-SWIR Camera Series. 2023. <https://www.emberion.com/products/vs20-vis-swir-camera/>
5. Ekimov A. I., Onushchenko A. A. Quantum size effect in three-dimensional microscopic semiconductor crystals / *JETP Lett.* **34**, 345 (1981).
6. Ekimov A. I., Efros A. L., Onushchenko A. A. Quantum size effect in semiconductor microcrystals / *Solid State Commun* **56**, 921–924 (1985). [https://doi.org/10.1016/S0038-1098\(85\)80025-9](https://doi.org/10.1016/S0038-1098(85)80025-9)
7. Rossetti R., Nakahara S., Brus L. E. Quantum size effects in the redox potentials, resonance Raman spectra, and electronic spectra of CdS crystallites in aqueous solution / *J Chem Phys.* **79**, 1086–1088 (1983). <https://doi.org/10.1063/1.445834>
8. Murray C. B., Norris D. J., Bawendi M. G. Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites / *J. Am Chem Soc.* **115**, 8706–8715 (1993). <https://doi.org/10.1021/ja00072a025>
9. Lee S., Hahm D., Yoon S.-Y., et al. Quantum-dot and organic hybrid light-emitting diodes employing a blue common layer for simple fabrication of full-color displays / *Nano Res.* **15**, 6477–6482 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4204-y>
10. Saran R., Curry R. J. Lead sulphide nanocrystal photodetector technologies / *Nat Photonics* **10**, 81–92 (2016). <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.280>
11. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Popov S. V. (2022) Photoelectronics Based on 0D Materials. *J Commun Technol Electron.* **67**, S1–S36 (2022). doi: 10.1134/S106422692213006X (Ponomarenko V. P., Popov V. S. and Popov S. V. Fotelektronika na osnove kvazinul'mernykh struktur / *Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics)* **9**, 25–67 (2021) [in Russian].)
12. Malinowski P., Georgitzikis E., Maes J., et al. Thin-Film Quantum Dot Photodiode for Monolithic Infrared Image Sensors / *Sensors* **17**, 2867 (2017). <https://doi.org/10.3390/s17122867>
13. Thom R. D. High density infrared detector array. 1977.
14. Gréboval C., Darson D., Parahyba V., et al. Photoconductive focal plane array based on HgTe quantum dots for fast and cost-effective short-wave infrared imaging / *Nanoscale* **14**, 9359–9368 (2022). <https://doi.org/10.1039/D2NR01313D>
15. Leemans J., Pejović V., Georgitzikis E., et al. Colloidal III–V Quantum Dot Photodiodes for Short-Wave Infrared Photodetection / *Adv Sci.* **9**, 1–8 (2022). <https://doi.org/10.1002/advs.202200844>
16. Malinowski P., Pejovic V., Bentell J., et al. Augmented Vision Enabled by Imagers Based on PbS Quantum Dots. In: *Lectures. AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515. Wunstorf, Germany, 2023*, pp. 121–122.
17. Steckel J. S., Josse E., Pattantyus-Abraham A. G., et al. 1.62  $\mu\text{m}$  Global Shutter Quantum Dot Image Sensor Optimized for Near and Shortwave Infrared. In: *2021 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. IEEE, pp 23.4.1–23.4.4 (2021).
18. Liu J., Liu P., Chen D., et al. A near-infrared colloidal quantum dot imager with monolithically integrated readout circuitry / *Nat Electron* **5**, 443–451 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41928-022-00779-x>
19. Luo Y., Tan Y., Bi C., et al. Megapixel large-format colloidal quantum-dot infrared imagers with resonant-cavity enhanced photoresponse / *APL Photonics* **8** (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0145374>
20. About. SWIR Vision Systems. (2023). <https://www.swirvisionsystems.com/about/>
21. Gregory C., Hilton J. A., Violette K., et al. Colloidal quantum dot sensor bandwidth and thermal stability / *Infrared Technology and Applications XLVIII. SPIE* **12107**, 3 (2022).
22. Hilton A., Wyman S. J., Garcia C., et al. High-definition broad-band visible-SWIR sensors for laser mark detection / *Infrared Technology and Applications XLIX. SPIE* **12534**, 1253406 (2023).
23. PRESS RELEASE: New high technology company established based on leading edge research. 2016. <https://www.emberion.com/new-high-technology-company-established-based-leading-edge-research/>
24. Emberion VS20 VIS-SWIR camera launched at VISION. 2021. <https://www.emberion.com/emberion-vs20-vis-swir-camera-launched-at-vision/>
25. Hu C., Aubert T., Justo Y., et al. The micropatterning of layers of colloidal quantum dots with inorganic ligands using selective wet etching / *Nanotechnology* **25**, 175302 (2014). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/25/17/175302>
26. Georgitzikis E., Malinowski P. E., Haglsieb L. M., et al. NIR Sensors Based on Photolithographically Patterned PbS QD Photodiodes for CMOS Integration. In: *2018 IEEE SENSORS / IEEE*, pp. 1–4. 2018.
27. Georgitzikis E., Malinowski P. E., Li Y., et al. Integration of PbS Quantum Dot Photodiodes on Silicon for NIR Imaging / *IEEE Sens J.* **20**, 6841–6848 (2020). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2933741>
28. Pejovic V., Georgitzikis E., Lee J., et al. Infrared Colloidal Quantum Dot Image Sensors / *IEEE Trans Electron Devices* **69**, 2840–2850 (2022). <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3133191>
29. Lee J., Georgitzikis E., Li Y., et al. Imaging in Short-Wave Infrared with 1.82  $\mu\text{m}$  Pixel Pitch Quantum Dot Image Sensor. In: *2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) / IEEE*, pp. 16.5.1–16.5.4 (2020).
30. Zeissler K Quantum dot image sensors scale up. / *Nat Electron* **4**, 861–861 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00701-x>

31. Vision China Show|Products. (2023). [http://www.visionchinasshow.net/twx\\_ensz/exhibit/product\\_list.aspx?zs=1344](http://www.visionchinasshow.net/twx_ensz/exhibit/product_list.aspx?zs=1344)
32. Klem E. J. D., Gregory C. W., Cunningham G. B. et al. Planar PbS quantum dot/C60 heterojunction photovoltaic devices with 5.2 % power conversion efficiency / Appl. Phys. Lett. **100** (2012). <https://doi.org/10.1063/1.4707377>
33. Klem E. J. D., Gregory C., Temple D., Lewis J. PbS colloidal quantum dot photodiodes for low-cost SWIR sensing / SPIE. Infrared Technology and Applications XLI **9451**, 945104 (2015).
34. Allen M., Bessonov A., Ryhänen T. Graphene Enhanced QD Image Sensor Technology / SID Symp Dig Tech Pap. **52**, 987–990 (2021). <https://doi.org/10.1002/sdtp.14855>
35. Yang J., Sharma A., Yoon J. W., et al. Structurally Driven Ultrafast Charge Funneling in Organic Bulk Heterojunction Hole Transport Layer for Efficient Colloidal Quantum Dot Photovoltaics / Adv Energy Mater. **13**, 1–13 (2023). <https://doi.org/10.1002/aenm.202203749>
36. Yuan Y., Xu J.-L., Zhang J.-Y., et al. Interface Engineering for High Photoresponse in PbS Quantum-Dot Short-Wavelength Infrared Photodiodes / IEEE Electron Device Lett. **43**, 1275–1278 (2022). <https://doi.org/10.1109/LED.2022.3183602>
37. Vafaie M., Fan J. Z., Morteza Najarian A., et al. Colloidal quantum dot photodetectors with 10-ns response time and 80% quantum efficiency at 1.550 nm / Matter. **4**, 1042–1053 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.12.017>
38. Shuklov I. A., Demkin D. V., Konavicheva V. A. et al. Issledovanie protsessy zameny ligandov v tonkikh sloyakh kolloidnykh kvantovykh tochek sul'fida svitsa s pomoshch'yu IK-Fur'e spektroskopii / Applied Physics, № 6, 35–42 (2022) [in Russian].
39. Ganeev R. A., Shuklov I. A., Zvyagin A. I. et al. Synthesis and low-order optical nonlinearities of colloidal HgSe quantum dots in the visible and near infrared ranges. Opt Express **29**, 16710 (2021). doi: 10.1364/OE.425549
40. Popov V. S., Ponomarenko V. P., Demkin D. V. et al. Fotochuvstvitel'nost' nanostruktur s energeticheskim bar'erom na osnove kolloidnykh kvantovykh tochek PbS / Doklady RAN. Fizika. Tekhnicheskie nauki **511** (1), 78–82 (2023). doi: 10.31857/S2686740023040120
41. Tang X., Ackerman M. M., Guyot-Sionnest P. Thermal Imaging with Plasmon Resonance Enhanced HgTe Colloidal Quantum Dot Photovoltaic Devices / ACS Nano **12**, 7362–7370 (2018). <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b03871>
42. Zhang S., Bi C., Qin T., et al. Wafer-Scale Fabrication of CMOS-Compatible Trapping-Mode Infrared Imagers with Colloidal Quantum Dots / ACS Photonics **10**, 673–682 (2023). <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c01699>
43. Milenkovich T., Shuklov I. A., Mardini A. A., Popov V. S. Study of Photoresistor Fabrication Based on Mercury Chalcogenides Applying Various Ligand Exchanges. In: IOCN 2023. MDPI, Basel Switzerland, 2023, p. 21.

PACS: 81.07.-t, 81.10.-b

## Hybrid monolithic IR arrays based on colloidal quantum dots and 2D materials

V. S. Popov<sup>1,2</sup>, V. P. Ponomarenko<sup>1,2</sup> and S. V. Popov<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Orion R&P Association, JSC

9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology

9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

<sup>3</sup> Shvabe Holding

176 Prospekt Mira, Moscow, 129366, Russia

<sup>4</sup> Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

3 Ordzhonikidze, Moscow, 115419, Russia

Received 9.11.2023; revised 20.11.2023; accepted 24.11.2023

***In the last few years, the technology of hybrid monolithic arrays based on colloidal quantum dots has been intensively developing. This new technology will significantly reduce the cost of photodetectors. Current paper provided a review of advanced achievements in the field of creating array photosensors based on colloidal quantum dots and 2D materials. Parameters of commercially produced array sensors and prototypes based on colloidal quantum dots were analyzed.***

**Keywords:** photosensor, IR array, colloidal quantum dots, CQD, graphene.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-45-53