

УДК 621.383.4/5
EDN: GYMBFMPACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz,
07.57.Kp, 85.60.Dw**Матричное фотоприемное устройство средневолнового ИК диапазона спектра с *n*Vn-архитектурой из CdHgTe с барьерным слоем на основе сверхрешетки***К. О. Болтарь, И. Д. Бурлаков, Н. И. Яковлева, М. В. Седнев, А. В. Трухачев, Н. А. Иродов, А. А. Лопухин, Е. В. Пермикина, А. В. Войцеховский, Д. И. Горн, Н. Н. Михайлов*

*Исследовано матричное фотоприемное устройство (МФПУ) средневолнового ИК диапазона спектра с *n*Vn-архитектурой CdHgTe с барьерным слоем на основе сверхрешетки. МФПУ состоит из матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) формата 64×64 с шагом 40 мкм, гибридизированной с кремниевой БИС считывания. Фоточувствительная сборка из МФЧЭ и БИС считывания исследовалась в вакуумном технологическом криостате с заливкой жидким азотом. Исследованы спектральные и фотоэлектрические характеристики МФПУ на основе *n*Vn-гетероструктур из *n*-слоев CdHgTe со сверхрешетками при оптимальном напряжении смещения. Среднее значение обнаружительной способности составило $D^* \sim 7 \times 10^{10}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2}, среднее значение вольтовой чувствительности S_u составило $S_u \sim 6 \times 10^7$ В/Вт.*

Ключевые слова: *n*Vn-гетероструктура; MWIR; HgCdTe; КРТ; матрица фоточувствительных элементов (МФЧЭ); спектральная характеристика.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-1-38-44

1. Введение

Развитие методов эпитаксиального выращивания материала Cd_xHg_{1-x}Te, и, прежде всего, молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), дало возможность решения ряда технологических проблем по созданию матричных

высокотемпературных (High Operating Temperature) фотоприемных устройств (ФПУ, Focal Plane Array, FPA) [1, 2], и позволило разработать сложные многослойные барьерные гетероструктуры КРТ для изготовления фоточувствительных элементов (ФЧЭ) нового дизайна

Болтарь Константин Олегович^{1,2}, нач. НТК, д.ф.-м.н.
Бурлаков Игорь Дмитриевич^{1,3}, зам. ген. директора по инновациям и науке, д.т.н., профессор.
Яковлева Наталья Ивановна¹, гл.н.с., д.т.н.
E-mail: niakovleva@mail.ru
Седнев Михаил Васильевич¹, нач. участка, к.т.н.
Трухачев Антон Владимирович¹, вед. инженер.
Иродов Никита Александрович¹, нач. участка.
Лопухин Алексей Алексеевич¹, нач. участка, к.т.н.
Пермикина Елена Вячеславовна¹, вед. инженер-технолог.

Войцеховский Александр Васильевич⁴, зав. кафедрой, д.ф.-м.н.

Горн Дмитрий Игоревич⁴, зав. лаб., к.ф.-м.н.
E-mail: gorn_dim@sibmail.com

Михайлов Николай Николаевич⁵, с.н.с., к.ф.-м.н.

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 МИРЭА – Российский технологический университет. Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

⁴ Томский государственный университет. Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

⁵ Институт физики полупроводников СО РАН им. А. В. Ржанова.

Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13.

Статья поступила в редакцию 12.12.2024

После доработки 27.12.2024

Принята к публикации 7.02.2025

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Болтарь К.О., Бурлаков И. Д., Яковлева Н. И., Седнев М. В., Трухачев А. В., Иродов Н. А., Лопухин А. А., Пермикина Е. В., Войцеховский А. В., Горн Д. И., Михайлов Н. Н., 2025

и топологии. Слои с униполярным типом проводимости образуют *nVn*-гетероструктуры, которые используются для формирования фоточувствительных элементов с минимальными темновыми токами [3–5]. Разделенная на отдельные фоточувствительные элементы методом меза-травления матрица на основе *nVn*-гетероструктуры не имеет в составе областей *p*-типа проводимости, при этом работа ФЧЭ обеспечивается подобно обычным фотодиодам подачей смещения на базовый и контактный слои.

Разработка новых барьерных архитектур ФЧЭ для матричных ФПУ MWIR- и LWIR-диапазонов на основе униполярных *nVn*-гетероструктур CdHgTe, в том числе со сверхрешетками в качестве барьера является актуальной задачей [6, 7], решение которой позволит перейти к изготовлению МФПУ нового типа с малым количеством дефектов, повышенной рабочей температурой охлаждения и высокими фотоэлектрическими параметрами.

В работе рассматривается концепция построения МФПУ MWIR-диапазона на основе *nVn*-гетероструктур из *n*-слоев CdHgTe со сверхрешетками в качестве барьера. На основе выращенных методом МЛЭ барьерных *nVn*-гетероструктур изготовлены МФЧЭ различной топологии с поглощающим слоем *n*-CdHgTe. Исследованы спектральные и фотоэлектрические характеристики фотоприемных устройств MWIR-диапазона на основе *nVn*-гетероструктур CdHgTe со сверхрешетками в качестве барьера.

2. Архитектура барьерных *nVn*-структур на основе CdHgTe

Многослойные *nVn*-гетероструктуры Cd_xHg_{1-x}Te выращены в ИФП СО РАН методом МЛЭ на оптически прозрачных подложках GaAs (013) [8, 9]. На подложке последовательно формировались буферный слой ZnTe (~ 30 нм), релаксирующий буферный слой CdTe (5,5 мкм), варизонный слой Cd_xHg_{1-x}Te (~ 1 мкм). Рабочая активная область *nVn*-структуры Cd_xHg_{1-x}Te состояла из поглощающего, барьерного и контактного слоев (рис. 1). Поглощающий слой Cd_xHg_{1-x}Te имел толщину порядка 3–4 мкм, содержание CdTe в барьерном слое и состав в контактном слое толщиной ~ 1 мкм выбирались в соответствии с рабочим спектральным диапазоном.

Контактный <i>n</i> +-слой CdHgTe, толщина 0,5 мкм
Барьерный слой на основе сверхрешетки
Поглощающий <i>n</i> -слой CdHgTe, толщина 3–4 мкм
Варизонный слой CdHgTe
Буферный слой CdTe, толщина 5,5 мкм
Буферный слой ZnTe, толщина 0,03 мкм
Оптически прозрачная подложка GaAs (013)

Рис. 1. Послойная конфигурация барьерных *nVn*-структур со сверхрешеткой на основе CdHgTe

Послойная конфигурация барьерных *nVn*-структур средневолнового ИК диапазона спектра на основе CdHgTe со сверхрешетками представлена в таблице 1.

Таблица 1

Параметры слоев *nVn*-гетероструктуры на основе CdHgTe

Наименование слоя в структуре	Концентрация, см ⁻³	Состав, мол. дол.	Толщина, мкм
Контактный слой <i>n</i> -Cd _x Hg _{1-x} Te	$n \sim (1-3) \times 10^{16}$	0,3	0,5
Барьерный слой <i>n</i> -Cd _x Hg _{1-x} Te	–	0,03 (яма) / 0,75 (барьер)	0,004(барьер) / 0,010 (яма); 10 периодов 0,140 (общая)
Поглощающий <i>n</i> -слой Cd _x Hg _{1-x} Te	$n \sim (3-5) \times 10^{15}$	0,3	3,0–4,0
Варизонный слой CdHgTe	–	1,0–0,3	1,0
Буферный слой CdTe	–	–	5,5
Буферный слой ZnTe	–	–	0,03
Подложка GaAs (013), Ø 50,8 мм			600

В процессе выращивания легирование рабочей области проводилось донорной примесью индия, концентрация примеси в поглощающем и барьерном выбиралась примерно одинаковой, а в контактном слое – в несколько раз выше.

Профиль распределения состава n Вп-гетероструктуры КРТ в области барьера для 10-ти периодной сверхрешетки из показано на рис. 2.

Как показано на рисунке 2, в многослойной гетероструктуре $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ слева

направо от поглощающего слоя состава $x = 0,28$ мол. дол. имеется сверхрешетка, состоящая из 10 периодов из слоев $\text{HgTe}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, при этом широкозонный слой представляет собой $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ состава $x = 0,72$ мол. дол., а слой ямы образован полуметаллическим соединением HgTe , толщина барьерного слоя примерно в 4 раза меньше слоя HgTe , поверх барьерного слоя выращен контактный слой состава $x = 0,3$ мол. дол.



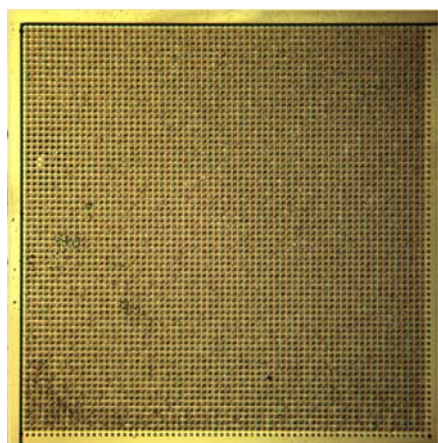
Рис. 2. Профиль распределения состава n Вп-гетероструктуры КРТ в области барьера для 10-ти периодной сверхрешетки

3. Исследования и обсуждение результатов

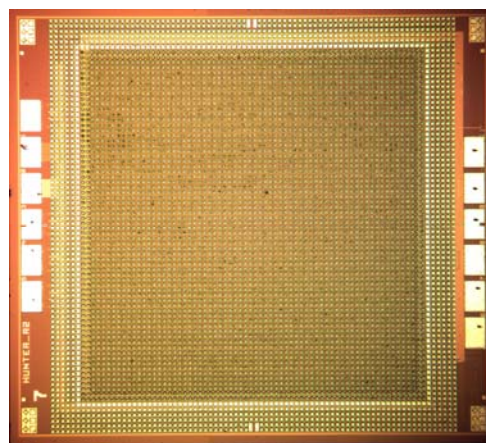
Матричные фотоприемные устройства MWIR диапазона изготовлены на основе n Вп-гетероструктур CdHgTe со сверхрешетками в качестве барьера. Матрицы фоточувствительных элементов формата 64×64 с шагом 40 мкм получены методом меза-травления. Кристалл матрицы формата 64×64 элемента имел габаритные размеры $\sim 2,74 \times 2,74$ мм (рис. 3а). Локальный размер контактной n -области составил $0,02 \times 0,02$ мм, к каждому

элементу матрицы методом фотолитографии изготовлен омический In-микроконтакт.

Кремниевая большая интегральная схема (БИС) (рис. 3б) считывания, предварительной аналоговой обработки и вывода сигналов с матрицы формата 64×64 элементов обеспечивала накопление фототока на емкости накопления и мультиплексирование фотосигнала в 2 аналоговых выхода. Гибридная сборка МФЧЭ и БИС, полученная «flip-chip»-методом, располагалась в фокальной плоскости оптической системы с вакуумном криостате для детектирования фотосигнала при рабочей температуре $T = 77$ К.



а) кристалл МФЧЭ



б) кристалл БИС-считывания формата 64×64 элементов

Рис. 3. МФЧЭ и БИС-считывания формата 64×64 элемента с шагом 40 мкм

Измерены вольтамперные характеристики тестовых элементов МФПУ при $T = 300\text{ K}$ (рис. 4) и относительные характеристики спектральной чувствительности при $T = 77\text{ K}$ (рис. 5).

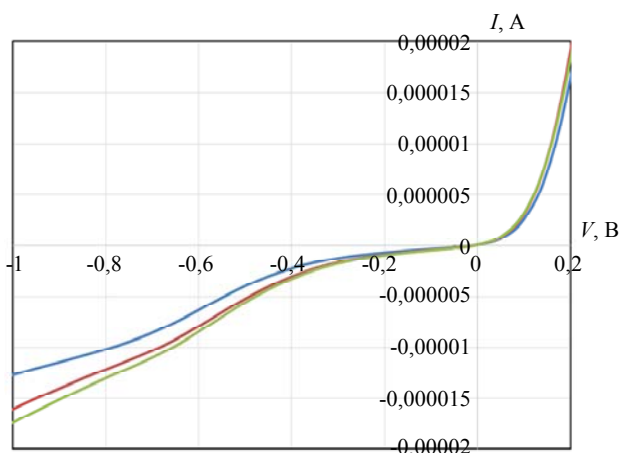


Рис. 4. ВАХ тестовых элементов ФПУ формата 64×64 элементов с шагом 40 мкм средневолнового ИК диапазона спектра (3–5 мкм) при $T = 300\text{ K}$

Вольт-амперная характеристика ФПУ MWIR диапазона (рис. 4) отличается от ВАХ n/p - фотодиода из-за однополярной природы. Представленная ВАХ при прямом напряжении смещения определяет темновой ток, который генерируется в объеме коллектора, а при обратном напряжении – в объеме базового слоя. В области поглощения уровень легирования составил $N_d \sim 3 \times 10^{15}\text{ см}^{-3}$, время жизни $\sim 10^{-5}\text{ с}$, толщина области поглощения $\sim 3\text{--}4\text{ мкм}$. Напряжение плоских зон (flat band) составило примерно $V_{fb} \approx -0,2\text{ В}$. Ток генерации-

рекомбинации в области обеднения проявлялся при напряжениях смещения $V > V_{fb}$, а туннельный ток – при напряжении смещения $V > V_{fb} + E_g \approx (0,2 + 0,25)\text{ В}$. Туннельный механизм обусловлен ловушками с концентрацией ловушек порядка $N_t \sim 10^{11}\text{ см}^{-3}$.

Компоненты темнового тока для ФПУ на основе nVn -структуры с барьерным слоем идентичны токовым компонентам, определяющим поведение носителей заряда в фотодиоде, за исключением туннельного тока, который изменяется с учетом наличия барьера (при небольших смещениях он мал, а при повышении напряжения смещения туннельная составляющая тока возрастает).

Относительная спектральная характеристика чувствительности тестового ФЧЭ при $T = 77\text{ K}$ представлена на рисунке 5.

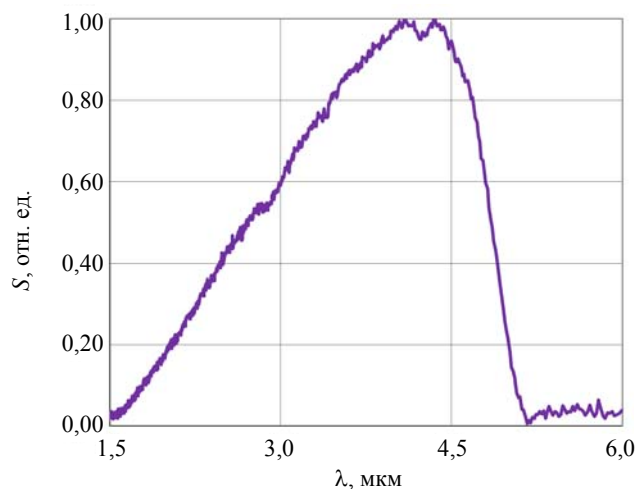
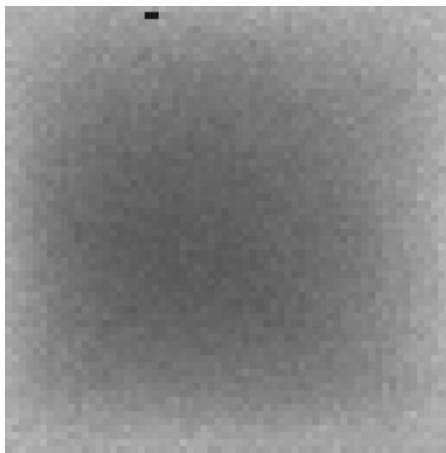


Рис. 5. Относительная спектральная характеристика чувствительности ФЧЭ при $T = 77\text{ K}$, $\lambda_{гр} = 4,88\text{ мкм}$

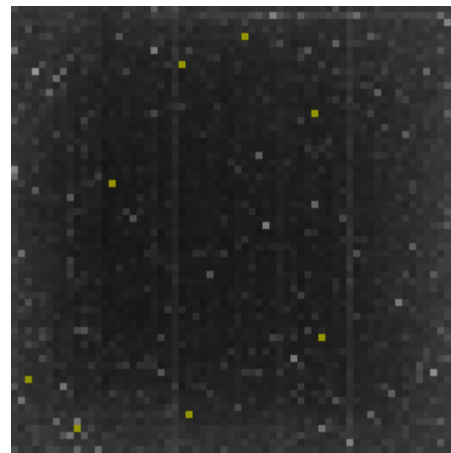
Длинноволновая граница спектральной характеристики фоточувствительности по уровню 0,5 для ФПУ MWIR-диапазона составила $\lambda_{гр} = 4,88$ мкм, она формировалась выбором состава x соединения $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (КРТ), а коротковолновая граница по уровню 0,5 $\lambda_k = 2,72$ мкм определялась поглощением излучения в варизонном слое nVn -гетероструктуры толщиной ~ 1 мкм.

Для проведения измерений основных фотоэлектрических параметров МФПУ формата 64×64 элементов с шагом 40 мкм на основе nVn -гетероструктур использовалась автоматизированная система сбора и обработки информации, позволяющая в автоматическом режиме измерять напряжения шума и фотосигнала каждого элемента и на их основе рассчитывать фотоэлектрические параметры. Проведены измерения фотосигнала и шума МФПУ ФПУ средневолнового ИК диапазона спектра, диаграммы распределения фотосигнала и шума представлены на рисунке 6 а, б.

Параметры МФПУ средневолнового ИК диапазона спектра формата 64×64 элементов с шагом 40 мкм на основе nVn -гетероструктур CdHgTe сравнивались со значениями параметров МФПУ на основе объемного InSb при относительном отверстии охлаждаемой диафрагмы 1:0,9 (таблица 2).



а) распределение фотосигнала при $T=77$ К



б) распределение шума при $T=77$ К

Рис. 6. Распределение сигнала и шума МФПУ1 формата 64×64 элементов с шагом 40 мкм на основе nVn -гетероструктуры HgCdTe средневолнового ИК диапазона спектра

Таблица 2

Фотоэлектрические параметры МФПУ формата 64×64 элементов с шагом 40 мкм

№ ФПУ	Время накопления, мкс	Граничная длина волны, мкм	Вольтовая чувствительность, S_u , В/Вт	Обнаружительная способность D^* , $\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$
МФПУ1	99	4,88	$5,2 \times 10^7$	$6,7 \times 10^{10}$
МФПУ2	99	4,92	$6,4 \times 10^7$	$7,4 \times 10^{10}$
ФПУ-InSb	120	5,48	$1,0 \times 10^8$	$8,8 \times 10^{10}$

Из таблицы и графиков видно, что диаграммы распределения сигнала и шума по матрицам 64×64 элементов, а также средние значения основных фотоэлектрических параметров подтверждают возможность создания МФЧЭ и МФПУ на основе nVn -гетероструктур HgCdTe со сверхрешетками в качестве барьера. Полученные на первой стадии исследований невысокие значения обнаружительной способности свидетельствуют о

необходимости доработки технологии как в части пассивации МФЧЭ, так и в части выращивания nVn гетероструктур HgCdTe с широконными барьерами.

4. Заключение

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии получены многослойные nVn -гетероструктуры с поглощающим n -слоем CdHgTe и

со сверхрешетками в качестве барьера для изготовления матричных фоточувствительных элементов нового дизайна и топологии. На их основе изготовлены и исследованы матрицы фоточувствительных элементов и ФПУ формата 64×64 элемента с шагом 40 мкм.

Измерены вольтамперные характеристики тестовых элементов ФПУ средневолнового ИК диапазона спектра при НКУ. Результаты измерений ВАХ при $T = 300$ К показали, что компоненты темного тока для ФПУ на основе n Vn-структуры с барьерным слоем идентичны компонентам, определяющим поведение носителей заряда в p/n -фотодиоде, за исключением туннельного тока, который изменяется с учетом влияния барьерного слоя. Спектральная характеристика фоточувствительности ФПУ соответствовала средневолновому ИК диапазону спектра с длинноволновой границей порядка $\lambda_{0,5} \sim 4,9$ мкм, что совпадает с окном прозрачности атмосферы.

Среднее значение обнаружительной способности для МФПУ1 составило $D^*_1 = 6,7 \times 10^{10}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2}. Среднее значение вольтовой чувствительности S_u по элементам МФПУ1 составило $S_{u1} = 5,2 \times 10^7$ В/Вт. Среднее значение обнаружительной способности для МФПУ2 составило $D^*_2 = 7,4 \times 10^{10}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2}. Среднее значение вольтовой чувствительности S_u по элементам МФПУ2 составило $S_{u2} = 6,4 \times 10^7$ В/Вт. Различие в дефектности и значениях обнаружительной способности МФЧЭ для различных МФП-структур связано, по видимому, с качеством пассивации поверхности МФЧЭ. Для улучшения основных параметров необходима дальнейшая проработка технологии изготовления МФЧЭ, в том числе пассивации боковых поверхностей меза-

элементов, а также совершенствование ростовых процессов при изготовлении n Vn-гетероструктур HgCdTe со сверхрешеткой в качестве барьера.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 23-62-10021,
<https://rscf.ru/project/23-62-10021>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болтарь К. О., Булаков И. Д., Яковлева Н. И., Власов П. В., Лазарев П. С. / Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 2. С. 170–182.
2. Piotrowski J., Rogalski A. High-Operating-Temperature Infrared Photodetectors. – SPIE Press, Bellingham, 2007.
3. Izhnin I. I., Kurbanov K. R., Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Y. / Appl. Nanosci. 2020. Vol. 10. P. 4571–4576.
4. Akhavan N. D., Umama-Membreno Gu. R., Antoszewski J., Faraone L. / IEEE Trans Electron. Dev. 65. P. 591–598.
5. Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. / Journal of Electronic Materials. 2011. Vol. 40. № 8. P. 1624–1629.
6. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М., Васильев В. В., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Якушев М. В., Сидоров Г. Ю. / Прикладная физика. 2016. № 4. С. 83–86.
7. Kopytko M. et al. / J. Electron. Mater. 2015. Vol. 44. № 1. P. 158–166.
8. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu., Yakushev M. V. / Infr. Phys. and Techn. 2019. Vol. 102. P. 103035 (1–4).
9. Varavin V. S., Sabinina I. V., Sidorov G. Yu., Marin D. V., Remesnik V. G., Predein A. V., Dvoretzky S. A., Vasilyev V. V., Sidorov Yu. G., Yakushev M. V., Latyshev A. V. / Infrared Phys. Technol. 2020. Vol. 105. P. 103182. doi: 10.1016/j.infrared.2019.103182.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Medium wavelength IR spectral range CdHgTe FPA based on nBn architecture with superlattice barrier layer

K. O. Boltar^{1,2}, I. D. Burlakov^{1,3}, N. I. Iakovleva¹, M. V. Sednev¹, A. V. Trukhachev¹,
N. A. Irodov¹, A. A. Lopukhin¹, E. V. Permikina¹, A. V. Voitsekhovskii⁴, D. I. Gorn⁴
and N. N. Mikhailov⁵

¹ Orion R&P Association JSC

9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology

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

³ MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA)

78, Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia

⁴ National Research Tomsk State University

36 Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia

⁵ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences

13 Akademika Lavrent'eva Ave., 630090, Novosibirsk, Russia

Received 12.12.2024; revised 27.12.2024; accepted 7.02.2025

Medium wavelength IR spectral range CdHgTe FPA based on nBn architecture with superlattice barrier layer has been investigated. The FPA consists of a 64×64 format with a 40 μm step matrix of photosensitive elements, hybridized with a silicon Readout Integrated Circuit (ROIC). The photosensitive assembly of FPA and ROIC was located in a vacuum technological cryostat filling liquid nitrogen. The spectral and photoelectric parameters of FPAs based on nBn architecture with superlattice barrier layers have been measured at optimal bias voltage. The average detectivity value was of $D^* \sim 7 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2}$, the average voltage sensitivity value was of $S_u \sim 6 \times 10^7 \text{ V/W}$.

Keywords: unipolar photodetector; nBn-heterostructure; MWIR; HgCdTe; MCT; Focal Plane Array (FPA); spectral response.

REFERENCES

1. Boltar K. O., Burlakov I. D., Iakovleva N. I., Vlasov P. V., and Lazarev P. S., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **10** (2), 170–182 (2022) [in Russian].
2. Piotrowski J. and Rogalski A. High-Operating-Temperature Infrared Photodetectors, SPIE Press, Bellingham, 2007.
3. Izhnin I. I., Kurbanov K. R., Voitsekhovskii A. V., Nesselov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N. and Sidorov G. Y., Appl. Nanosci. **10**, 4571–4576 (2020).
4. Akhavan N. D., Umana-Membreno Gu. R., Antoszewski J. and Faraone L., IEEE Trans Electron. Dev. **65**, 591–598 (2018).
5. Itsuno A. M., Phillips J. D. and Velicu S., Journal of Electronic Materials **40** (8), 1624–1629 (2011).
6. Voitsekhovskii A. V., Nesselov S. N., Dzyadukh S. M., Vasil'ev V. V., Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Yakushev M. V. and Sidorov G. Yu., Applied Physics, № 4, 83–86 (2016) [in Russian].
7. Kopytko M. et al., J. Electron. Mater. **44** (1), 158–166 (2015).
8. Voitsekhovskii A. V., Nesselov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu. and Yakushev M. V., Infr. Phys. and Techn. **102**, 103035 (1–4) (2019).
9. Varavin V. S., Sabinina I. V., Sidorov G. Yu., Marin D. V., Remesnik V. G., Predein A. V., Dvoretzky S. A., Vasil'yev V. V., Sidorov Yu. G., Yakushev M. V. and Latyshev A. V., Infrared Phys. Technol. **105**, 103182 (2020). doi: 10.1016/j.infrared.2019.103182.