

УДК 621.383.4/5
EDN: CZNNQPPACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz,
07.57.Kp, 85.60.Dw**Исследования матричных фотоприемных устройств на основе барьерных структур КРТ средневолнового ИК диапазона спектра**© К. О. Болтарь^{1,2}, И. Д. Бурлаков^{1,3}, Н. И. Яковлева^{1,*}, А. В. Трухачев¹,
Д. И. Горн⁴, Н. Н. Михайлов⁵¹ АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: niiakovleva@mail.ru

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская обл., г. Долгопрудный, 141701, Россия³ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия⁴ Томский государственный университет, г. Томск, 634050 Россия⁵ Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, 630090, Россия

Статья поступила в редакцию 23.10.2025; после доработки 23.12.2025; принята к публикации 20.02.2026

Шифр научной специальности: 1.3.11

Исследованы матричные фотоприемные устройства (МФПУ) средневолнового ИК диапазона спектра (MWIR) на основе n Vn-гетероструктур с униполярными барьерами и с барьерами на основе сверхрешеток $HgTe/CdHgTe$. Измерены вольтамперные, спектральные характеристики и основные параметры фоточувствительных элементов (ФЧЭ) экспериментальных образцов МФПУ. Полученные результаты подтверждают возможность создания приборов на основе барьерных структур $CdHgTe$ средневолнового ИК диапазона спектра.

Ключевые слова: униполярный приемник, n Vn-гетероструктура, MWIR, $CdHgTe$, матрица фоточувствительных элементов (МФЧЭ), спектральная характеристика.

DOI: 10.51368/2307-4469-2026-14-1-14-22

1. Введение

Повышение рабочей температуры в инфракрасных (ИК) фотоприемных устройствах (ФПУ), предназначенных для тепловизионных и тепловизионных систем, является основной целью многих ведущих мировых разработчиков современной фотоэлектроники. Возможным решением для повышения рабочей температуры, а также достижения высоких параметров, являются ИК ФПУ на основе униполярных n Vn-гетероструктур $CdHgTe$ (КРТ) с широкозонными барьерами и со сверхрешетками в качестве барьеров, работающие в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм [1–4].

Создание барьерных n Vn-гетероструктур КРТ осуществляется с помощью современных

методов эпитаксиального выращивания материала $Cd_xHg_{1-x}Te$, и прежде всего, молекулярно-лучевой эпитаксии [5], поскольку МЛЭ обеспечивает получение многослойных структур с заданным уровнем легирования, концентрации и типом проводимости, что важно для достижения параметров качества.

Несмотря на видимые преимущества барьерных фотоприемников, реализация таких МФПУ является сложной задачей из-за наличия нежелательного разрыва в области зонной диаграммы на границе поглощающий/барьерный слои структуры КРТ. Распространение барьерного слоя в валентную зону n Vn-элемента ограничивает протекание неосновных носителей заряда (дырок), которые определяют полезную составляющую сигнала тока в таких устройствах. Разрыв в валентной

области можно уменьшить, если заменить барьерный слой на сверхрешетку HgTe/CdHgTe, что было предложено в профильных работах [6, 7].

Целью данной работы являлось изготовление и исследование фотоприемных устройств MWIR диапазона спектра на основе n Vn-архитектур с униполярными и многослойными барьерами на основе сверхрешеток из CdHgTe для создания матричных ИК ФПУ нового поколения.

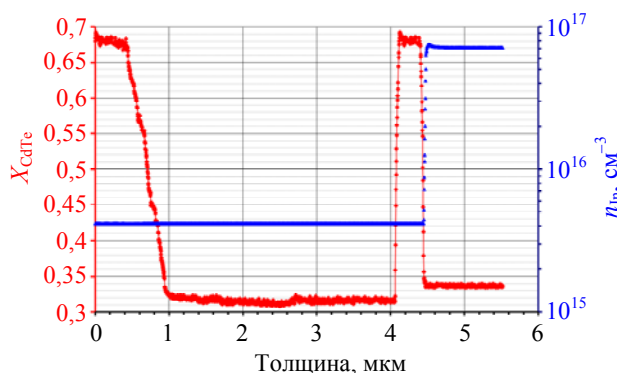
2. Конфигурация барьерных n Vn-структур на основе CdHgTe

Для изготовления матриц фоточувствительных элементов (МФЧЭ) выбраны n Vn-структуры MWIR-диапазона с униполярными барьерами и со сверхрешетками в качестве

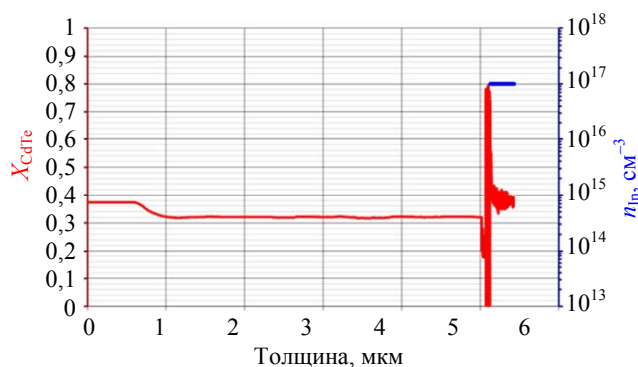
барьеров. Распределение состава по толщине в униполярных барьерных структурах CdHgTe с барьером (а) и со сверхрешеткой в качестве барьера (б) показаны на рисунке 1 (а, б).

Распределение состава в области барьерного слоя двух архитектур: с униполярным барьером и с барьером на основе сверхрешетки HgTe/CdHgTe, показано на рисунке 2 (а, б).

На рисунке 2а показано, что слева направо от подложки имеется барьер толщиной порядка ~ 400 нм состава $x = 0,7$, на рисунке 2б барьер толщиной порядка 130 нм образован сверхрешеткой, состоящей из 10 периодов HgTe/Cd_xHg_{1-x}Te, при этом широкозонный слой представляет собой тройной раствор Cd_xHg_{1-x}Te состава $x = 0,7$ мол. дол., второй слой образован полуметаллическим соединением HgTe, толщина слоев примерно соотносится как $\sim 2/5$.

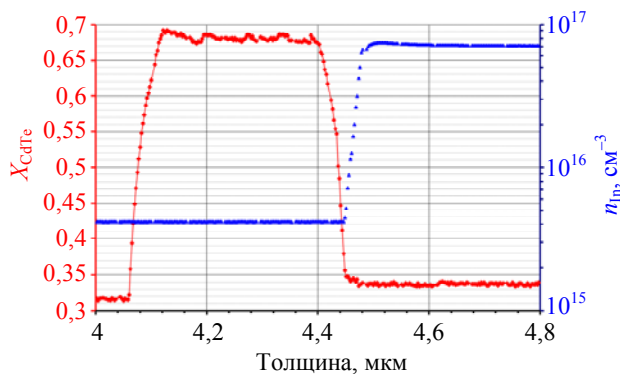


а) n Vn-гетероструктура на основе КРТ с широкозонным барьером

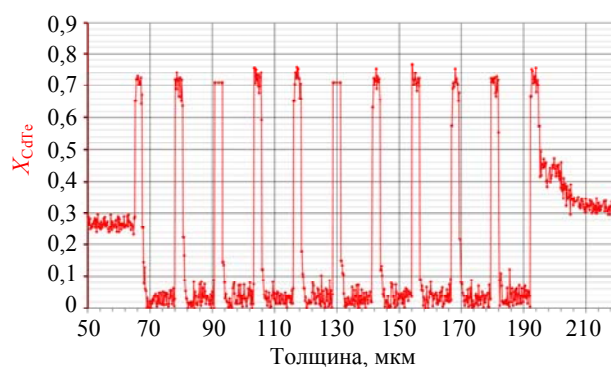


б) n Vn-гетероструктура на основе КРТ со сверхрешеткой в качестве барьера

Рис. 1. Распределение состава и концентрации легирующей примеси по толщине в барьерных n Vn-гетероструктурах на основе CdHgTe с поглощающим слоем состава $x = 0,3$



а) n Vn-гетероструктура на основе КРТ с широкозонным барьером



б) n Vn-гетероструктура на основе КРТ со сверхрешеткой в качестве барьера

Рис. 2. Распределение состава в области барьерного слоя двух архитектур: с униполярным барьером (а) и с барьером на основе сверхрешетки HgTe/CdHgTe (б)

Структуры на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ выращивались в ИФП СО РАН методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на оптически

прозрачных подложках GaAs (013) [8]. Параметры отдельных слоев $n\text{Вп}$ -структуры представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры слоев $n\text{Вп}$ -гетероструктур на основе CdHgTe

Наименование слоя в структуре	ГЭС КРТ с униполярным барьером			ГЭС КРТ со сверхрешеткой $\text{HgTe}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$		
	Концентрация, см^{-3}	Состав	Толщина, мкм	Концентрация, см^{-3}	Состав	Толщина, мкм
Контактный слой $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$	$n \sim (3-8) \times 10^{16}$	0,34	0,2	$n \sim (3-8) \times 10^{16}$	0,32	0,5
Барьерный слой $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$	—	0,7 (барьер)	0,35	—	0,72 (барьер)/ 0,03 (яма)	0,004 (барьер)/ 0,010 (яма); 10 периодов 0,140 (общая)
Поглощающий n -слой $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$	$n \sim (3-5) \times 10^{15}$	0,32	3,0–4,0	$n \sim (3-5) \times 10^{15}$	0,30	3,0–4,0
Варизонный слой CdHgTe	—	1,0–0,32	1,0	—	1,0–0,30	1,0
Буферный слой CdTe	—	—	5,5	—	—	5,5
Буферный слой ZnTe	—	—	0,03	—	—	0,03
Оптически прозрачная подложка GaAs (013), $\varnothing 50,8$ мм			600			600

Сверху подложки GaAs в ростовом процессе МЛЭ последовательно формировались буферный слой ZnTe (толщиной ~ 30 нм), релаксирующий буферный слой CdTe (толщиной $\sim 5,5$ мкм), варизонный слой $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (толщиной ~ 1 мкм). $n\text{Вп}$ -архитектура включала поглощающий, барьерный и контактный слои $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, концентрация легирующей примеси в поглощающем и барьерных слоях составляла $n \sim (3-5) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрация в контактном слое превышала $n > 3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Поглощающий слой $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ имел толщину порядка 3–4 мкм, содержание CdTe в барьерном слое и состав в контактном слое толщиной ~ 1 мкм выбирались в зависимости от рабочего спектрального диапазона. В процессе выращивания легирование рабочей области проводилось донорной примесью индия.

3. Изготовление и исследование МФПУ на основе $n\text{Вп}$ архитектур CdHgTe

В работах [9, 10] рассмотрены свойства барьерных $n\text{Вп}$ -архитектур на основе CdHgTe , в которых барьерный слой (В) эффективно подавляет токовую составляющую основных

носителей заряда (электронов). Одинаковый тип легирования в барьерном и поглощающем слое обуславливает низкий темновой ток, ограниченный диффузионным механизмом [11].

Матрицы фоточувствительных элементов на основе $n\text{Вп}$ -гетероструктур CdHgTe изготавливались по меза-технологии. Размер ФЧЭ и шаг между ними гарантировался топологическими размерами и точностью изготовления фотошаблонов. Разделение элементов матрицы осуществлялось ионно-плазменным травлением через маску фоторезиста до барьерного или буферного n -слоя с финишным жидкостным дотравливанием с целью получения резких по профилю боковых поверхностей и дна канавки с ровной поверхностью без дополнительных неоднородностей. Кристалл матрицы формата 64×64 элемента с шагом 40 мкм между рядами ФЧЭ имел габаритные размеры $\sim 2,74 \times 2,74$ мм. Локальный размер n -области (коллектора) составил $0,02 \times 0,02$ мм, к каждому элементу матрицы технологической операцией фотолитографии изготавливался омический контакт, общие индиевые микроконтакты изготавливались к базовой области кристалла МФЧЭ.

Матричная структура после операции меза-травления с фоточувствительными элементами, разделенными меза-канавками с индиевыми микроконтактами на поверхности показана на рисунке 3 (а, б).

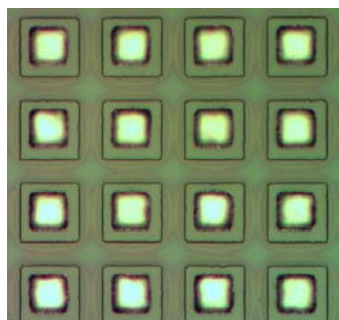
Расстояние между чувствительными элементами составило $\sim 11\text{--}13\text{ мкм}$. Выявлена анизотропная природа процесса травления в вертикальном направлении по отношению к поверхности структуры. На поверхности разделяющей канавки после травления наблюдались небольшие поверхностные неоднородности.

Травление на значительную глубину сопровождалось уменьшением маскирующего покрытия в процессе травления, что приводило к увеличению размера разделяющей канавки и уменьшению площади ФЧЭ. Элементы МФЧЭ с глубиной канавки, превышающей толщину барьерного слоя, имели небольшой разброс чувствительности по элементам матрицы. В процессе меза-травления выявлен ряд технологических проблем, одной из которых является необходимость пассивации боковой

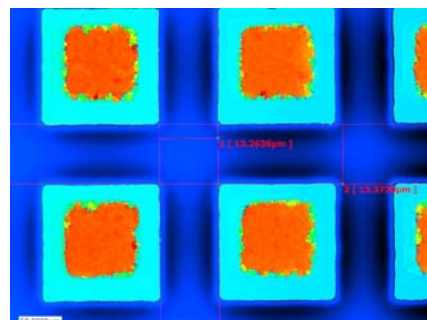
поверхности меза-элементов для защиты их поверхности с целью уменьшения процессов генерации-рекомбинации на поверхности после операции меза-травления.

Кремниевая БИС, предназначенная для считывания, предварительной аналоговой обработки и вывода фотосигналов с каждого элемента матрицы формата 64×64 элементов, обеспечивала накопление фототока на емкостях накопления, усиление и мультиплексирование в 2 аналоговых выхода.

Гибридизация МФЧЭ из КРТ и кремниевой БИС осуществлялась с помощью индиевых столбчатых микроконтактов методом диффузионной сварки давлением, позволяющим получить надежное электрическое соединение собираемых кристаллов. Гибридные кристаллы помещались в вакуумные криостатируемые корпуса. Выводы от контактных площадок кремниевой БИС разваривались на сапфировый растр навесными тонкими золотыми проводками, а затем с растра на внешние выводы корпуса МФПУ (рисунок 4а, б).

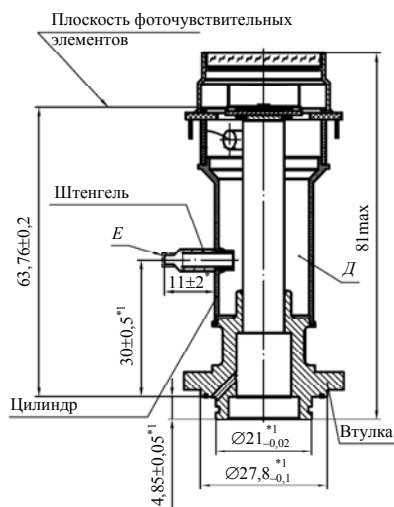


а) фрагмент МФЧЭ с In микроконтактами



б) измерение зазора между ФЧЭ

Рис. 3. Фрагмент МФЧЭ после операции меза-травления



а) конструкция корпуса



б) фотография МФПУ

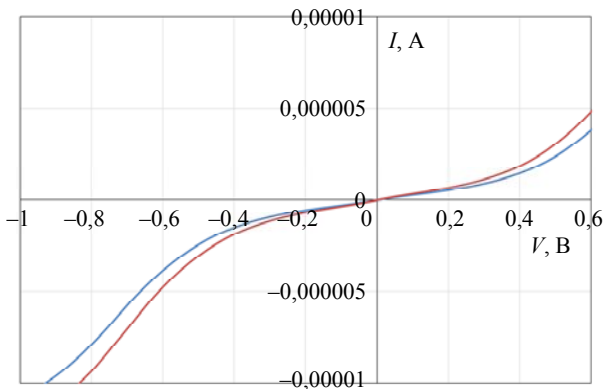
Рис. 4. Внешний вид МФПУ

Вольт-амперные характеристики тестовых ФЧЭ матриц МФЧЭ-01 и МФЧЭ-02 формата 64×64 элементов с шагом 40 мкм на основе *nВп*-гетероструктур CdHgTe при $T = 300$ К представлены на рисунке 5а и 5б соответственно.

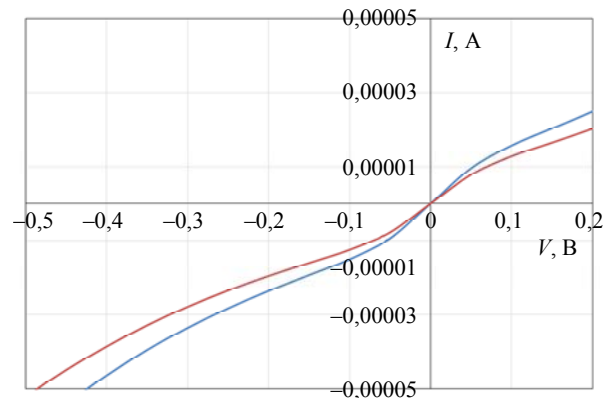
Проведены измерения спектральных характеристик чувствительности МФЧЭ на основе *nВп*-гетероструктур CdHgTe с широкозонным барьером и *nВп*-гетероструктур со

сверхрешеткой в качестве барьера. Результаты измерений спектральных характеристик тестовых элементов МФЧЭ показаны на рисунке 7 (а, б).

Результаты измерений: границ спектральной чувствительности тестовых элементов МФЧЭ на основе *nВп*-гетероструктур CdHgTe с широкозонным барьером (МФЧЭ-01) и со сверхрешеткой в качестве барьера (МФЧЭ-02), представлены в таблице 2.

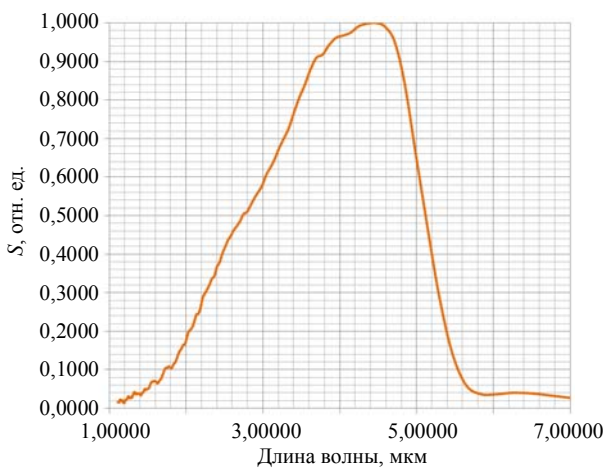


а) МФЧЭ-01 с широкозонным барьером

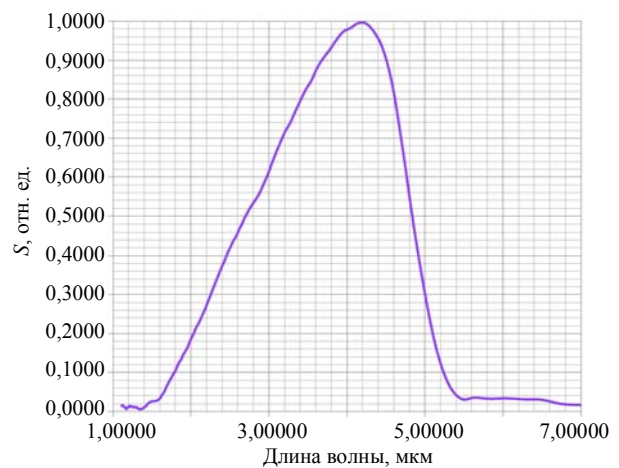


б) МФЧЭ-02 со сверхрешеткой в качестве барьера

Рис. 5. Вольтамперные характеристики тестовых ФЧЭ на основе *nВп*-гетероструктур CdHgTe с широкозонным барьером (а) и со сверхрешеткой в качестве барьера (б) при $T = 300$ К



а) МФЧЭ-01 с широкозонным барьером



б) МФЧЭ-02 со сверхрешеткой в качестве барьера

Рис. 7. Спектральные характеристики чувствительности тестовых элементов МФЧЭ на основе *nВп*-гетероструктур CdHgTe: (а) – с широкозонным барьером и (б) – со сверхрешеткой в качестве барьера

Таблица 2

Границы спектральной чувствительности МФЧЭ на основе *nВп* гетероструктур *n*-CdHgTe с широкозонным барьером (МФЧЭ-01) и со сверхрешеткой в качестве барьера (МФЧЭ-02)

Наименование параметров	Результаты измерений МФЧЭ-01	Результаты измерений МФЧЭ-02
1 Длинноволновая граница области спектральной чувствительности, мкм	5,13	4,84
2 Коротковолновая граница области спектральной чувствительности, мкм	2,74	2,70

Длинноволновая граница спектральной характеристики чувствительности составила у тестовых элементов экспериментальных образцов МФЧЭ-01 и МФЧЭ-02: $\lambda_{д0,5} = 5,13$ мкм и $\lambda_{д0,5} = 4,84$ мкм, она сформирована выбором состава x соединения $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (КРТ), а коротковолновая граница составила $\lambda_{к0,5} = 2,74$ мкм и $\lambda_{к0,5} = 2,70$ мкм, она определяется поглощением излучения в варизонном слое nVn -гетероструктуры толщиной 1 мкм.

Определение фотоэлектрических параметров МФПУ на основе nVn -гетероструктур $CdHgTe$ проводилось по данным измерений фотосигнала и шума. Для проведения измерений использовалась гибкая автоматизированная система сбора и обработки информации, работающая в автоматическом режиме. Укрупнено структура измерительной системы состояла из следующих основных узлов:

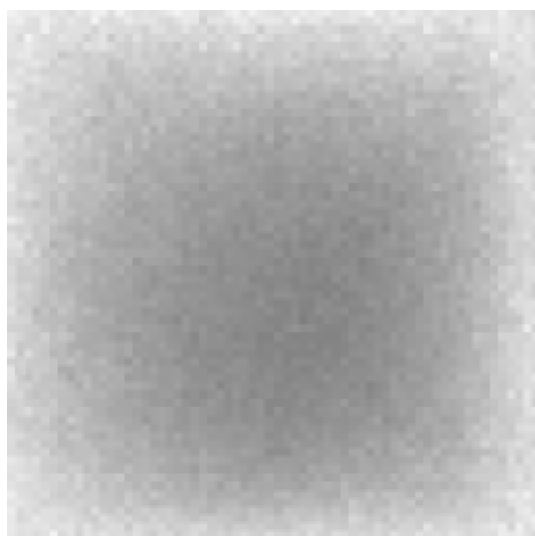
- формирователя оптического сигнала на основе абсолютно-черного тела (АЧТ);

- электроники управления (блока аналоговой обработки и управления ФПУ, блока аналого-цифровой обработки, блока сопряжения);

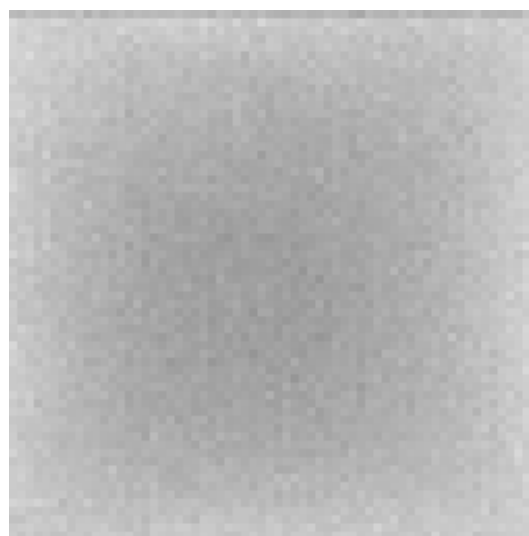
- системы измерения, в которую входили: вычислительный блок и интерфейсные платы.

Проведены измерения тока, фотосигнала и шума экспериментальных устройств: МФЧЭ-01 и МФЧЭ-02 средневолнового ИК диапазона спектра (диаграммы распределения тока по элементам матриц представлены на рисунке 8а, б).

Достижение высоких параметров МФПУ барьерного типа гарантируется как качеством исходных гетероструктур КРТ, так и технологией изготовления МФЧЭ, БИС и гибридной сборки на их основе по разработанному технологическому маршруту. Фотоэлектрические параметры барьерных МФПУ формата 64×64 элементов с шагом 40 мкм средневолнового ИК диапазона спектра на основе nVn -гетероструктур $CdHgTe$ представлены в таблице 3.



а) МФЧЭ-01



б) МФЧЭ-02

Рис. 8. Распределение тока по МФЧЭ формата 64×64 элементов с шагом 40 мкм на основе барьерных nVn -гетероструктур $CdHgTe$ MWIR-диапазона

Таблица 3

Фотоэлектрические параметры барьерных МФПУ формата 64×64 элементов с шагом 40 мкм средневолнового ИК диапазона спектра на основе nVn -гетероструктур $CdHgTe$

№ ФПУ	Фотоэлектрические параметры (800 К, $T_{нак} = 0,3$ мс)		
	Вольтовая чувствительность, S_v , В/Вт	Шум N , мкВ	Обнаружительная способность D^* , $см \cdot Гц^{1/2} \cdot Вт^{-1}$
МФЧЭ-01	$0,3 \times 10^8$	0,35	$0,52 \times 10^{11}$
МФЧЭ-02	$0,55 \times 10^8$	0,30	$0,61 \times 10^{11}$

Среднее значение обнаружительной способности для МФЧЭ-01 составило $D_{\text{ср}}^* = 0,52 \times 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$; среднее значение вольтовой чувствительности S_u по элементам МФЧЭ-01 составило $S_{\text{уср}} = 0,3 \times 10^8 \text{ В/Вт}$. Среднее значение обнаружительной способности для МФЧЭ-02 составило $D_{\text{ср}}^* = 0,61 \times 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$; среднее значение вольтовой чувствительности S_u по элементам МФЧЭ-02 составило $S_{\text{уср}} = 0,55 \times 10^8 \text{ В/Вт}$.

Полученные значения основных фотоэлектрических параметров подтверждают возможность создания МФПУ на основе *nVn*-гетероструктур CdHgTe с широкозонными барьерами и со сверхрешетками в качестве барьеров, а также правильность путей обработки технических и конструктивно-технологических решений их изготовления. Для дальнейшего улучшения основных параметров МФПУ необходима оптимизация архитектур чувствительного элемента и доработка технологии изготовления МФЧЭ на основе *nVn*-гетероструктур CdHgTe с широкозонными барьерами и *nVn*-структур со сверхрешетками в качестве барьеров.

4. Заключение

В работе представлены перспективные *nVn*-архитектуры на основе CdHgTe с униполярными барьерами и со сверхрешетками в качестве барьеров, экспериментально исследованы фотоэлектрические и спектральные характеристики, изготовленных на их основе МФПУ.

Получены следующие результаты:

Длинноволновая граница спектральной характеристики фоточувствительности тестовых элементов экспериментальных образцов МФПУ составила: $\lambda_{\text{д}0,5} \sim 5,0 \text{ мкм}$, она сформирована выбором состава x соединения $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, а коротковолновая граница составила $\lambda_{\text{к}0,5} \sim 2,7 \text{ мкм}$, она определялась поглощением излучения в варизонном слое *nVn*-гетероструктуры толщиной 1 мкм. Значение обнаружительной способности порядка $10^{11} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$, вольтовой чувствительности 10^8 В/Вт . Полученные значения основных фотоэлектрических параметров подтверждают возможность создания МФПУ на основе *nVn*-гетероструктур CdHgTe с широкозонными

ми барьерами и со сверхрешетками в качестве барьеров, а также правильность путей обработки технических и конструктивно-технологических решений их изготовления. Для дальнейшего улучшения основных параметров МФПУ необходима оптимизация архитектур фоточувствительного элемента и доработка технологии изготовления МФЧЭ на основе *nVn*-гетероструктур CdHgTe с широкозонными барьерами и *nVn*-структур со сверхрешетками в качестве барьеров, а также оптимизация БИС считывания МФПУ для данного типа фоточувствительного элемента.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. / Прикладная физика. 2025. № 1. С. 38–44.
2. Войцеховский А. В., Горн Д. И. / Прикладная физика. 2016. № 4. С. 83–86.
3. Kopytko M. et al. / J. Electron. Mater. 2015. Vol. 44. № 1. P. 158–166.
4. Rogalski A., Martyniuk P., Kopytko M., Hu W. / Appl. Sci. 2021. Vol. 11. P. 501.
5. Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Ремесник В. Г., Сабинаина И. В., Сидоров Ю. Г., Швец В. А., Якушев М. В., Латышев А. В. / Автометрия. 2020. Т. 56. № 5. С. 12–26.
6. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Jolley G., Antoszewski J., Faraone L. / Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105. № 12.
7. Войцеховский А. В., Дзядх С. М., Горн Д. И., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В. / Прикладная физика. 2022. № 3. С. 37–42.
8. 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. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103182>.
9. 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).
10. Jiale He, Peng Wang, Qing Li, Fang Wang, Yue Gu, Chuan Shen, Lu Chen, Piotr Martyniuk, Antoni Rogalski, Xiaoshuang Chen, Wei Lu, Weida Hu / IEEE Trans. Electron Devices. 2020. Vol. 67. № 5.
11. Voitsekhovskiy A. V., Dzyadukh S. M., Gorn D. I., Dvoretzskii S. A., et al. / Journal of Communications Technology and Electronics. 2024. Vol. 69. № 4–6. P. 231–235. <https://doi.org/10.1134/S1064226924700372>.

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

Investigation of focal plane arrays based on CdHgTe barrier structures for medium-wavelength IR spectral range

K. O. Boltar^{1,2}, I. D. Burlakov^{1,3}, N. I. Iakovleva^{1,*}, A. V. Trukhachev¹,
D. I. Gorn⁴, and N. N. Mikhailov⁵

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

* E-mail: niiakovleva@mail.ru

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

³ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

⁴ National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050 Russia

⁵ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

Received 23.10.2025; revised 23.12.2025; accepted 20.02.2026

Using experimental technology, focal plane arrays (FPAs) for the medium-wavelength spectral range (MWIR) based on nBn-heterostructures with unipolar barriers and HgTe/CdHgTe superlattices barriers have been manufactured and investigated. The current-voltage, spectral characteristics and performance of photosensitive elements of experimental samples have been measured. The obtained values of the performance confirm the possibility of creating FPAs based on CdHgTe nBn-heterostructures with wide-band barriers and superlattices as barriers, as well as the correctness of ways to develop technical and constructive technological solutions for their manufacture.

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., Sednev M. V., Trukhachev A. V., Irodov N. A., Lopukhin A. A., Permikina E. V., Voitsekhovskiy A. V., Gorn D. I., and Mikhailov N. N., Applied Physics, № 1, 38–44 (2025) [in Russian].
2. Voitsekhovskiy A. V. and Gorn D. I., Applied Physics, № 4, 83–86 (2016) [in Russian].
3. Kopytko M. et al., J. Electron. Mater. **44** (1), 158–166 (2015).
4. Rogalski A., Martyniuk P., Kopytko M., and Hu W., Appl. Sci. **11**, 501 (2021).
5. Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Remesnik V. G., Sabinina I. V., Sidorov Yu. G., Shvets V. A., Yakushev M. V., and Latyshev A. V., Autometry **56** (5), 12–26 (2020).
6. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Jolley G., Antoszewski J., and Faraone L., Appl. Phys. Lett. **105** (12), (2014).
7. Voitsekhovskiy A. V., Dzyadukh S. M., Gorn D. I., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu., and Yakushev M. V., Applied Physics, № 3, 37–42 (2022) [in Russian].
8. Varavin V. S., Sabinina I. V., Sidorov G. Yu., Marin D. V., Remesnik V. G., Predein A. V., Dvoretzky S. A., Vasiliev V. V., Sidorov Yu. G., Yakushev M. V., and Latyshev A. V., Infrared Phys. Technol. **105**, 103182 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103182>.
9. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov 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).
10. Jiale He, Peng Wang, Qing Li, Fang Wang, Yue Gu, Chuan Shen, Lu Chen, Piotr Martyniuk, Antoni Rogalski, Xiaoshuang Chen, Wei Lu, and Weida Hu, IEEE Trans. Electron Devices **67** (5), (2020).
11. Voitsekhovskiy A. V., Dzyadukh S. M., Gorn D. I., Dvoretzky S. A., et al., Journal of Communications Technology and Electronics **69** (4–6), 231–235 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1064226924700372>.

Об авторах

Болтарь Константин Олегович, д.ф.-м.н., директор по прикладным разработкам, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9); Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9). E-mail: boltarko@yandex.ru SPIN-код: 9249-2720, AuthorID: 171355

Бурлаков Игорь Дмитриевич, д.т.н., профессор, заместитель генерального директора по инновациям и науке, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9); МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78). SPIN-код: 6042-3634, AuthorID: 171368

Яковлева Наталья Ивановна, д.т.н., главный научный сотрудник НТЦ МФЭ, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: niiakovleva@mail.ru SPIN-код: 1077-9113, AuthorID: 602076

Трухачев Антон Владимирович, ведущий инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: orionmoscow@mail.ru

Горн Дмитрий Игоревич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36). E-mail: gorn_dim@sibmail.com SPIN-код: 4514-3163, AuthorID: 724442

Михайлов Николай Николаевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников СО РАН (630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13). E-mail: mikhailov@isp.nsc.ru SPIN-код: 3449-3155, AuthorID: 107682