

УДК 621.383.4/5:621.315.5

Исследование двухспектрального многорядного фотоприемного устройства на основе ГЭС КРТ

К. О. Болтарь, В. В. Полунеев, Н. И. Яковлева, И. А. Денисов, Н. А. Смирнова

Исследованы параметры двухспектрального фотоприемного устройства (ДФПУ) формата 2×2×288 элементов, изготовленного на основе гетероэпитаксиальной структуры КРТ, выращенной методом жидкофазной эпитаксии. Элементы спектрального диапазона 8—12 мкм располагаются на поверхности МФЧЭ в узкозонном фоточувствительном слое КРТ, а элементы спектрального диапазона 3—5 мкм — в кармане глубины порядка 6 мкм в широкозонном фоточувствительном слое КРТ. Расстояние между фоточувствительными линейками 2×288 спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм составляет менее 100 мкм при шаге 28 мкм. Фотоэлектрические характеристики обоих многорядных фоточувствительных линеек формата 2×288 элементов ДФПУ спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм близки к теоретическому пределу, обусловленному шумом фонового излучения.

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

Ключевые слова: Cd_xHg_{1-x}Te, КРТ, гетероэпитаксиальные структуры, жидкофазная эпитаксия, матрица фоточувствительных элементов, двухспектральное фотоприемное устройство, фотоэлектрические характеристики.

Введение

Односпектральные фотоприемные устройства (ФПУ), традиционно обладающие высокой чувствительностью, простотой конструкции и надежностью, широко используются в системах тепловидения и тепlopеленгации для обнаружения целей в ИК-диапазоне спектра [1].

Двухспектральные фотоприемные устройства имеют существенные преимущества по сравнению с односпектральными ФПУ при наблюдении за объектами, имеющими особенности в различных спектральных областях ИК-диапазона. ДФПУ позволяют повысить информативность ИК-изображения за счет двухспектральности фотоприемного устройства, а, следовательно, повысить вероятность

обнаружения и захвата целей, а также улучшить помехозащищенность тепловизионных систем.

В работе изложены результаты исследований ДФПУ формата 2×2×288 элементов, работающего в режиме временной задержки и накопления (ВЗН) и предназначенного для детектирования ИК-излучения в спектральных диапазонах 3—5 и 8—12 мкм.

Отличительные особенности конструкции ДФПУ:

- простота конструкции;
- детектирование излучения двухспектральной матрицей фоточувствительных элементов, расположенных на единой оптической оси с расстоянием 84 мкм между фоточувствительными линейками спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм при шаге между каналами не более 28 мкм;
- простота юстировки сканера.

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК¹, профессор².

Полунеев Владимир Васильевич, главный специалист¹.

Яковлева Наталья Ивановна, начальник отдела¹.

¹ГНЦ РФ ФГУП «НПО "Орион"».

Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Денисов Игорь Андреевич, начальник отдела.

Смирнова Наталья Анатольевна, ведущий научный

сотрудник.

ФГУП "Гиредмет".

Россия, 119017, Москва, Б. Толмачевский пер. 5, стр. 1.

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2010 г.

Архитектура матрицы фоточувствительных элементов на основе КРТ и кремниевой БИС считывания

Архитектура матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) представлена на рис. 1. В данной работе реализован интегральный вариант архитектуры МФЧЭ из КРТ, в которой линейки чувствительных элементов (3—5 и 8—12 мкм) расположены рядом в двухслойной гетероструктуре КРТ, причем элементы спектрального диапазона 8—12 мкм формируются в верхнем слое гетероэпитаксиальной структуры, где состав КРТ соответствует спектральному диапазону 8—12 мкм,

а элементы спектрального диапазона 3—5 мкм располагаются в кармане глубины порядка 5—6 мкм, где состав КРТ соответствует спектральному диапазону 3—5 мкм.

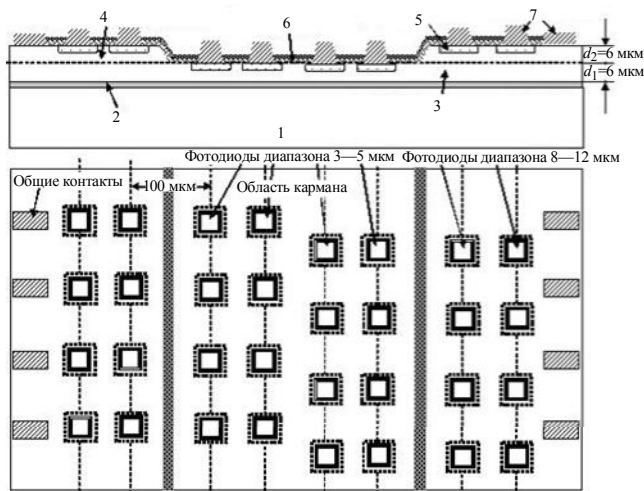


Рис. 1. Фрагмент многоярной двухспектральной матрицы фоточувствительных элементов с карманом:

- 1 — подложка CdZnTe; 2 — буферный слой CdTe;
- 3 — первый рабочий широкозонный ($x = 0,28 \pm 0,05$) фоточувствительный слой CdHgTe p -типа проводимости постоянного состава толщиной 6 мкм; 4 — второй рабочий узкозонный ($x = 0,22 \pm 0,05$) фоточувствительный слой CdHgTe p -типа проводимости постоянного состава толщиной 6 мкм;
- 5 — полупроводниковый материал CdHgTe n -типа проводимости, формирующий фотодиоды; 6 — диэлектрическое покрытие; 7 — индиевые столбики к фоточувствительным элементам и общие контакты

Кристалл матрицы формата 2×2×288 (с шагом 28 мкм) имеет габаритные размеры 8,7×1,5 мм. Он содержит две группы по две линейки 2×288, в которых расположены с шагом 0,056 мм фотодиоды. Каждый фотодиод имеет размер фоточувствительной площадки 0,028×0,028 мм.

Матрица фоточувствительных элементов не является планарной. Структура матрицы является симметричной относительно вертикальной оси, что обеспечивает выравнивание кристалла при операции стыковки с кремниевой схемой считывания сигнала.

В процессе работы фотоприемного устройства потоки излучения с энергией кванта $h\nu_1 \geq E_g$ (первого спектрального диапазона 3—5 мкм) и $h\nu_2 \geq E_g$ (второго спектрального диапазона 8—12 мкм) проходят через подложку 1 из CdZnTe, затем проходят через буферный слой 2 из CdTe, после чего поток излучения первого спектрального диапазона поглощается в первом широкозонном рабочем фоточувствительном слое 3 состава $x = 0,28 \pm 0,05$, а поток второго спектрального диапазона поглощается во втором узкозонном фоточувствительном слое 4 состава $x = 0,22 \pm 0,05$. Неравновесные носители заряда, генерированные излучением в сло-

ях 3 и 4 диффундируют к областям объемного заряда, образованным на границах полупроводников p - и n -типа, где втягиваются электрическим полем p - n -переходов и принимают участие в процессе возникновения электрического тока.

Данная архитектура двухспектрального фотоприемного устройства позволяет реализовать максимальную вольтговую чувствительность, во-первых, за счет уменьшения поверхностной рекомбинации на границе раздела буферного и первого фоточувствительного слоя в связи с выбором материала буферного слоя с близким периодом кристаллической решетки и, во-вторых, за счет расширения спектральной области фоточувствительности для второго диапазона (8—12 мкм), в связи с отсутствием запирающего слоя между первым и вторым фоточувствительными слоями.

Предложенная архитектура представляется предпочтительной с точки зрения:

- конструкции охлаждаемого узла ФПУ, так как охлаждаемый узел имеет небольшие габариты, малую рассеиваемую мощность;
- считывания информации, так как данный вариант позволяет параллельно считывать информацию в двух спектральных диапазонах без ее потери;
- реализации простых алгоритмов сканирования изображения.

На рис. 2 представлена структурная схема БИС.

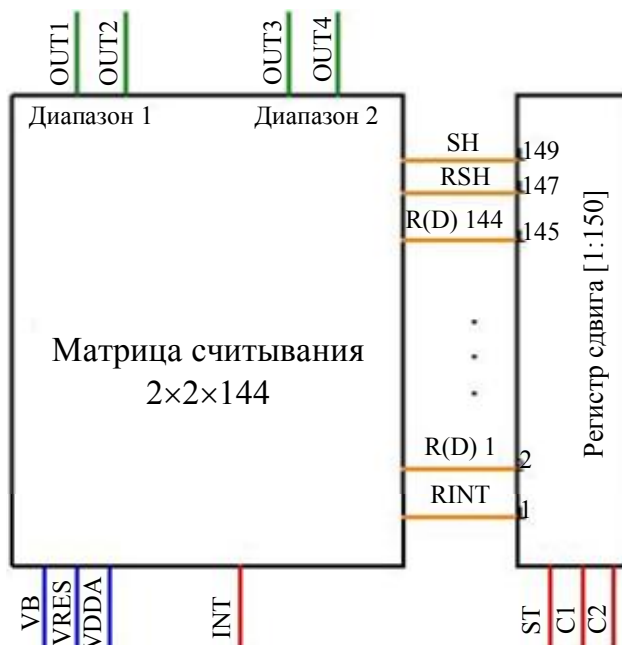


Рис. 2. Кремниевая БИС считывания сигнала: структурная схема

Кремниевая интегральная схема работает как интегратор и мультиплексор фототоков, сгенерированных в фотодиодах ИК-излучением. Двухспектральное фотоприемное устройство имеет

особенность, состоящую в различии токов для фотодиодов диапазонов 3—5 и 8—12 мкм. Для устранения данного различия применено топологическое решение, состоящее в использовании различных по площади емкостей накопления в регистре накопления БИС считывания (емкости накопления составляют 0,5 и 2 пФ). Вследствие использования различных по площади емкостей накопления фотосигнал для диапазонов 3—5 и 8—12 мкм выравнивается.

Параллельность считывания фотосигнала в двух спектральных областях достигается за счет смешанной разводки выводов фотодиодов спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм.

Таким образом, разработанная специально для ДФПУ кремниевая БИС считывания обеспечивает:

- параллельность считывания фотосигнала в двух спектральных областях 3—5 и 8—12 мкм;
- совместимость каналов считывания (общая диодная полярность, стандартные требования смещения);
- незначительное время обработки фотосигналов.

Двухспектральные гетероэпитаксиальные структуры КРТ

Многорядное фотоприемное устройство было изготовлено на основе двухспектральных гетероэпитаксиальных структур КРТ, выращенных в ФГУП "Гиредмет". Структура образцов представлена на рис. 3, а.

Гетероэпитаксиальная структура на основе трехкомпонентного твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$ (ГЭС КРТ) включала оптически прозрачную подложку диаметром 20 мм ориентации (111) из $Cd_{1-y}Zn_yTe$ ($y = 0,02—0,05$) с буферным слоем, состав которого x плавно изменялся от $1,0 \pm 0,05$ до $0,28 \pm 0,05$ мольных долей в направлении от подложки. На этом слое в первом процессе кристаллизации из двухфазной смеси в закрытой системе методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) выращивался первый рабочий фоточувствительный слой $Cd_xHg_{1-x}Te$ состава $x = 0,28 \pm 0,05$ толщиной порядка 5—6 мкм, затем во втором процессе кристаллизации из двухфазной смеси в закрытой системе методом жидкофазной эпитаксии выращивался второй рабочий фоточувствительный слой $Cd_xHg_{1-x}Te$ состава $x = 0,22 \pm 0,05$ толщиной порядка 5—6 мкм.

Таким образом, два рабочих фоточувствительных слоя постоянного состава p -типа проводимости соответствовали двум областям фоточувствительности устройства (3—5 и 8—12 мкм). Для получения необходимой концентрации материала p -типа порядка $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ слои подвергались отжигу при температурах 340—360 °С в течение 3—10 ч [2].

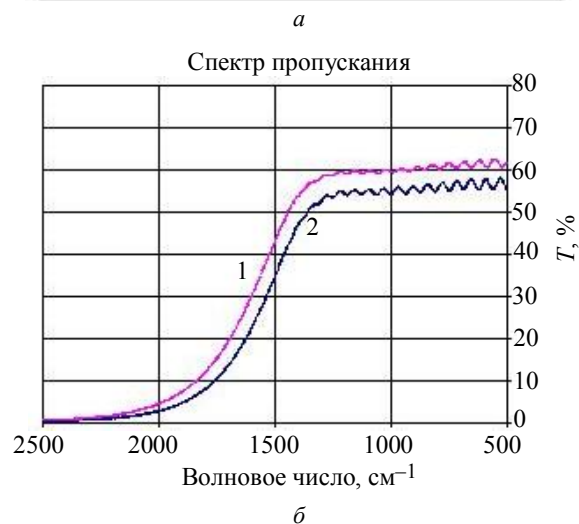
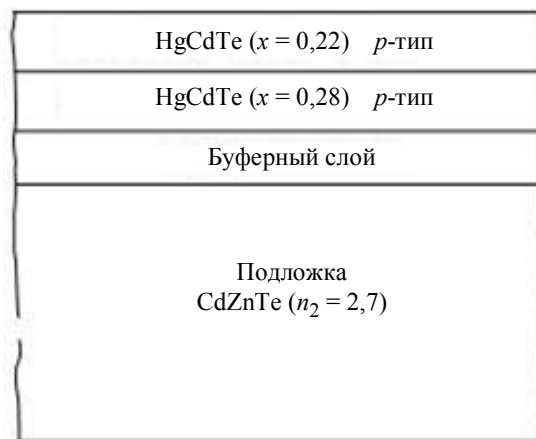


Рис. 3. Схема двухспектральной гетероэпитаксиальной структуры КРТ (а) и спектры пропускания структур КРТ (б)

На рис. 3, б представлены спектры пропускания двухспектральных структур КРТ с характерной интерференцией излучения в длинноволновой области. За счет плавности границы перехода между фоточувствительными слоями спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм спектры пропускания двухспектральных структур КРТ имели вид подобный однослойным структурам. В табл. 1 представлены паспортные данные и данные входного контроля двухспектральных ГЭС КРТ ЖФЭ.

Таблица 1

Паспортные данные				Данные входного контроля					
Образец	Состав x	$d_{\text{пас}}$, мкм	P , см^{-3}	μ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	T_{max} , %	x	$d_{\text{изм}}$, мкм	λ , мкм	n
T208-3	0,222	6	$1,9 \cdot 10^{16}$	470	58	0,220	6,2	10,59	3,45
T208-3	0,270	8	$1,8 \cdot 10^{16}$	480		0,256	7,8	5,6	3,43
T208-4	0,220	7	$1,1 \cdot 10^{16}$	510	63	0,219	7,15	10,44	3,45
T208-4	0,280	8	$1,0 \cdot 10^{16}$	500		0,265	8,33	5,3	3,42

Соответствие параметров, представленных в табл. 1 на ГЭС КРТ и полученных в результате метода подгонки параметров по матричной модели Абея [3, 4], удовлетворительное. Отличие в основном касается параметров буферного слоя. Результат расчета толщин хорошо соответствует паспортным данным.

Изготовление двухспектрального фотоприемного устройства

Для изготовления двухспектральной матрицы фоточувствительных элементов в гетероэпитаксиальной структуре КРТ с двумя рабочими фоточувствительными слоями проводились технологические операции по сформированию карманов в верхнем фоточувствительном слое двухспектральной гетероэпитаксиальной структуры КРТ глубиной порядка 6 мкм, равной толщине верхнего рабочего фоточувствительного слоя КРТ состава $x = 0,22$. Контроль граничной длины волны в области кармана после операции травления проводился по спектрам пропускания (рис. 4).

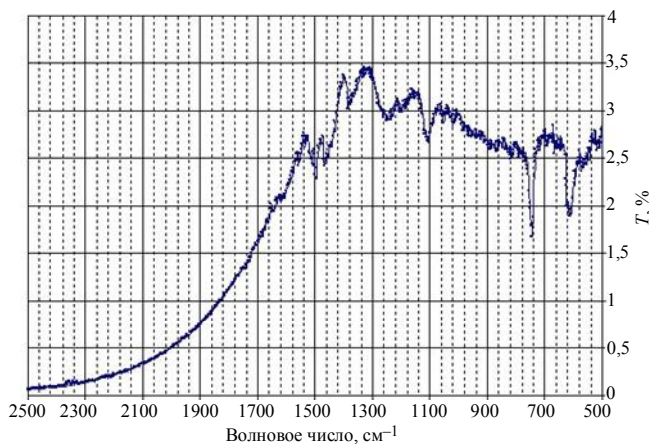


Рис. 4. Двухспектральная гетероэпитаксиальная структура КРТ. Спектр пропускания в области кармана: Образец — Т208. Хим. травление 6 мин. Нейтр. NaNO_2 . Гр. длин. волн — 50 мкм. — пропускание, %

На поверхности фоточувствительных слоев выращивалось диэлектрическое пассивирующее покрытие толщиной порядка 1 мкм. На разновысокой гетероэпитаксиальной структуре с диэлектрическим покрытием с помощью технологических операций — фотолитографии и химического травления с последующим вскрытием окон в диэлектрике в местах расположения чувствительных элементов формировались p - n -переходы.

Расстояние между фоточувствительными линейками двух областей спектральной чувствительности (3—5 и 8—12 мкм) было выбрано таким образом, чтобы надежно проводить технологические операции фотолитографии и химического травления. Исходя из экспериментальных исследований, расстояние между фоточувствительными

линейками двух типов спектральной чувствительности (3—5 и 8—12 мкм) в месте перепада высот на гетероэпитаксиальной структуре составило 84 мкм.

Кремниевая интегральная БИС считывания фотосигнала изготавливалась по стандартной кремниевой технологии ФГУП «НПО "Орион"».

Индиевые микроконтакты (рис. 5) у матрицы фоточувствительных элементов и кремниевой БИС двухспектрального устройства многорядного типа выполнены разновысокими: индиевые микроконтакты МФЧЭ — более высокие на краях и менее высокие в центре (в кармане); напротив, для кремниевой БИС — они более высокие в центре и менее высокие на краях. Разная высота индиевых микроконтактов позволила с высокой точностью и высоким процентом выхода годных стыковать МФЧЭ и кремниевую БИС методом холодной сварки, так как более высокие столбики в центральной части БИС соединяются с низкими столбиками МФЧЭ.

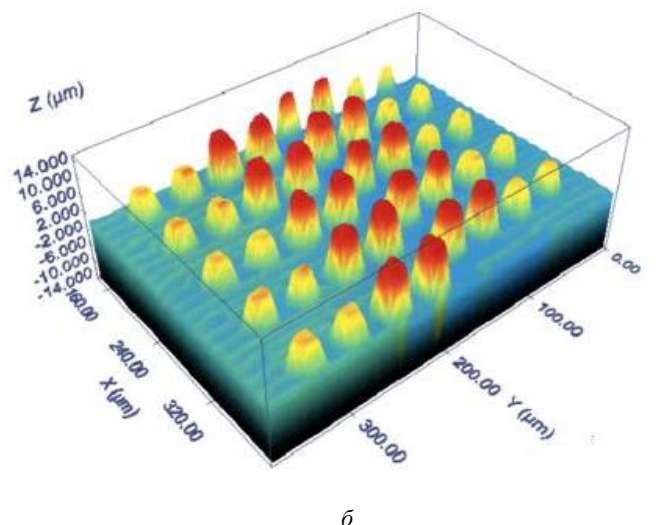
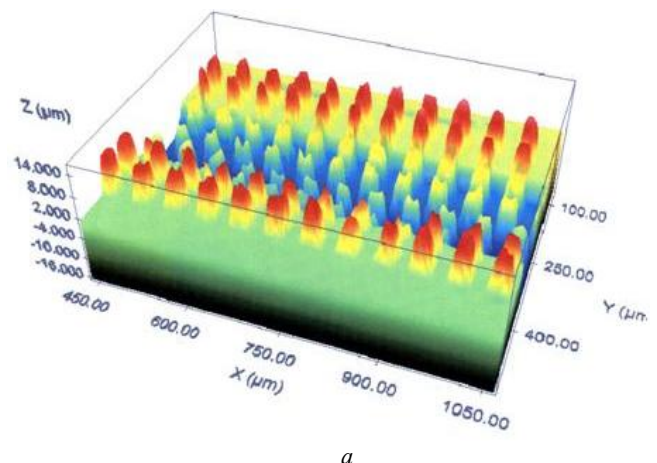


Рис. 5. Профилограммы кристалла МФЧЭ (а) и кристалла мультиплексора (б) с разновысокими индиевыми микроконтактами для двухспектрального ФПУ

Исследование двухспектрального фотоприемного устройства

Исследованы параметры ДФПУ формата 2×2×288 элементов, изготовленного на основе ге-

терэпитаксиальной структуры КРТ, выращенной методом жидкофазной эпитаксии. На рис. 6 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) тестовых фотодиодов для двухспектральных линеек, на рис. 7 — их спектральные характеристики.

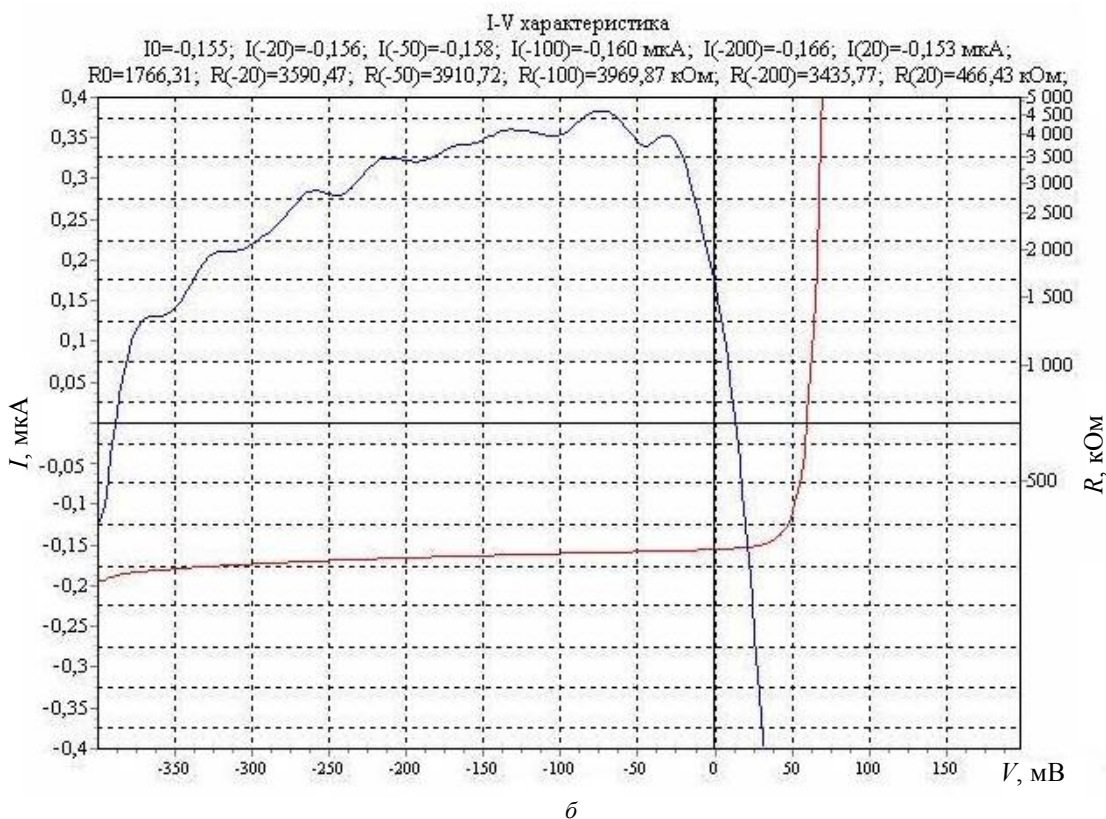
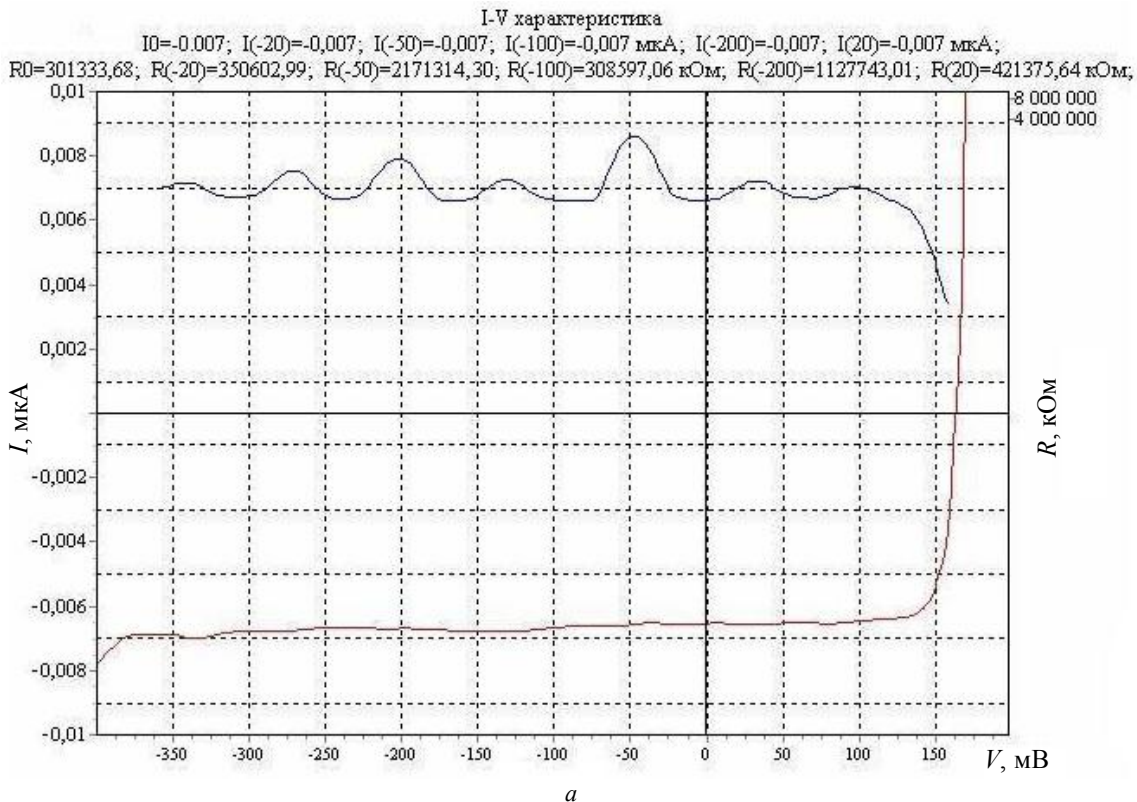


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики тестовых фотодиодов для двухспектральных линеек: а — МФЧЭ спектрального диапазона 3—5 мкм; б — МФЧЭ спектрального диапазона 8—12 мкм

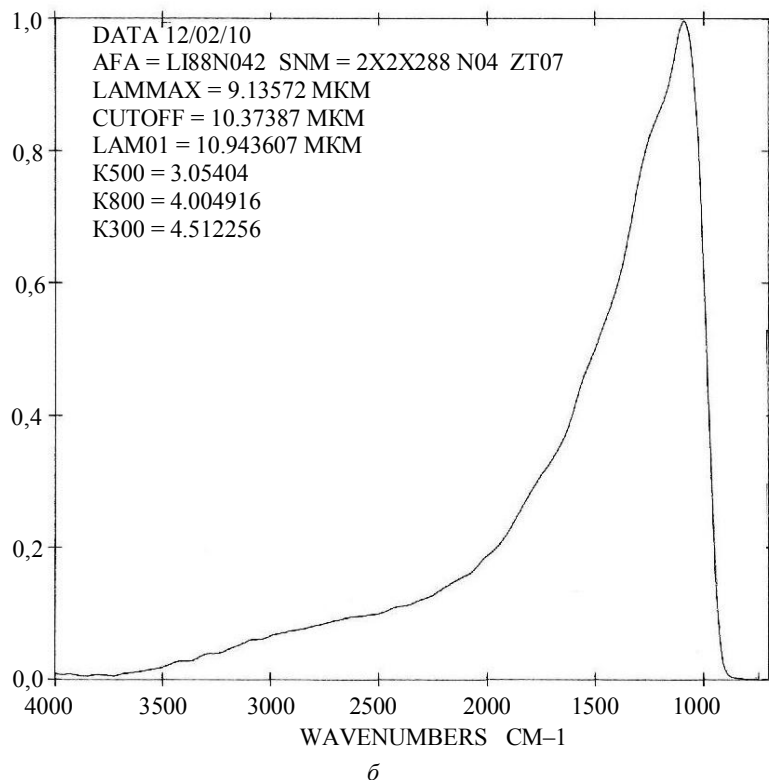
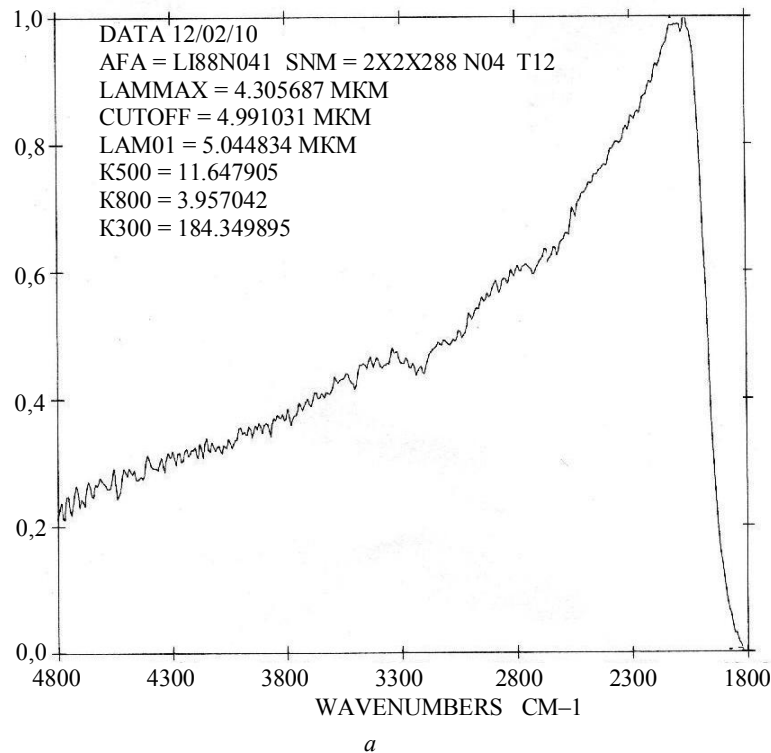


Рис. 7. Спектральные характеристики фоточувствительности тестовых фотодиодов для двухспектральных линеек: а — МФЧЭ спектрального диапазона 3—5 мкм; б — МФЧЭ спектрального диапазона 8—12 мкм

Между фоточувствительными слоями ДФПУ не имеется запорного слоя, при этом в спектральном диапазоне 8—12 мкм не происходит потери информативности ИК-изображения, так как вклад неравновесных носителей заряда за счет поглощения излучения с длиной волны 3—5 мкм в длинноволновом рабочем фоточувствительном слое

небольшой (~8%), что в процентном отношении мало по сравнению с вкладом неравновесных носителей, полученных в результате поглощения излучения с длиной волны 8—12 мкм.

Основные фотоэлектрические параметры экспериментального образца ФПМ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Наименование параметров	Результаты исследований в диапазоне, мкм	
	8—12	3—5
Длинноволновая граница области спектральной чувствительности, мкм	10,3	5,0
Коротковолновая граница области спектральной чувствительности, мкм	7,5	3,0
Среднее значение обнаружительной способности в режиме ВЗН, см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	6,04·10 ¹⁰	10,8·10 ¹⁰
Среднее значение вольтовой чувствительности в режиме ВЗН, В/Вт	6,2·10 ⁷	1,02·10 ⁸
Дисперсия неоднородности вольтовой чувствительности, %	20,5	16,1
Динамический диапазон выходного сигнала, дБ	71	71

В спектральном диапазоне 3—5 мкм среднее значение обнаружительной способности D^* по недефектным каналам составило $10,8 \cdot 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹. Среднее значение вольтовой чувствительности S_u по недефектным каналам составило $1,02 \cdot 10^8$ В/Вт. Дисперсия неоднородности вольтовой чувствительности S_u относительно среднего значения по недефектным каналам (среднеквадратичное значение) равнялась 16,1 %.

В спектральном диапазоне 8—12 мкм среднее значение D^* по недефектным каналам составило $6,04 \cdot 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹. Среднее значение S_u по недефектным каналам составило $6,2 \cdot 10^7$ В/Вт. Дисперсия неоднородности S_u относительно среднего значения по недефектным каналам равнялась 20,5 %.

Заключение

Предложенная архитектура ДФПУ многорядного типа обеспечивает высокую вольтовую чувствительность и интегральную обнаружительную способность при малых габаритах и позволяет де-

тектировать излучение в двух спектральных диапазонах (3—5 и 8—12 мкм) фотодиодами ДФПУ, расположенными на единой оптической оси с расстоянием менее 100 мкм между фоточувствительными линейками спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм при шаге между каналами не более 28 мкм.

Литература

1. Акимов В. М., Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Климанов Е. А., Мансветов Н. Г., Пономаренко В. П., Сагинов Л. Д., Соляков В. Н., Стафеев В. И., Тимофеев А. А., Филачев А. М. Матричные фотоэлектронные модули среднего и дальнего ИК-диапазонов спектра на основе фотодиодов из Cd_xHg_{1-x}Te для инфракрасной аппаратуры нового поколения//Прикладная физика. 2005. № 2. С. 7.
2. Белов А. Г., Белогорохов А. И., Лакеенков В. М. Об особенностях электрофизических свойств гетероструктур Cd_xHg_{1-x}Te/CdZnTe// ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 8. С. 917.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: пер. с англ./Под ред. Г. П. Мотулевич. — М.: Наука, 1970.
4. Уайт М. Г. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения: пер. с англ./Под ред. Р. А. Суриса. — М.: Мир, 1979. Часть II.

Investigation of 2×2×288 two-color MCT TDI FPA

K. O. Boltar^{1,2}, B. B. Poluneev¹, N. I. Iakovleva¹

¹Orion R&P Association, 9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow region, 141700, Russia

I. A. Denisov, N. A. Smirnova

GIREDMET, 5/1 Tolmachevsky al., Moscow, 119017, Russia

Performances of the 2×2×288 two-color MCT TDI FPA on the basis of MCT liquid phase heteroepitaxial structures have been investigated. Multilayer heteroepitaxial structure FPA is realized in such manner that the photodiodes of 8—12 μm spectral range are formed in top MCT sensitive layer, the photodiodes of 3—5 μm spectral range are formed into a pocket with 6 μm depth. The difference between photosensitive lines of 8—12 μm and 3—5 μm spectral ranges is less than 100 μm at 28 μm element-to-element pitch that provides the easy scanner adjustment. Photoelectric performances of the 2×2×288 two-color MCT TDI FPA in 3—5 and 8—12 μm spectral ranges are close to the theoretical limit restricted by a noise of background radiation.

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

Keywords: Cd_xHg_{1-x}Te, MCT, heteroepitaxial structures, liquid phase epitaxy, matrix of photosensitive elements, double-spectral photodetector, photoelectric characteristics.