

ЛИНЕЙЧАТЫЙ ФОТОПРИЕМНИК ФОРМАТА 288×4 С ДВУНАПРАВЛЕННЫМ РЕЖИМОМ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ И НАКОПЛЕНИЯ

© 2009 г. В. В. Васильев*, канд. физ.-мат. наук; А. В. Предеин*;
В. С. Варавин*, канд. физ.-мат. наук; Н. Н. Михайлов*, канд. физ.-мат. наук;
С. А. Дворецкий*, канд. физ.-мат. наук; В. П. Рева**, канд. физ.-мат. наук;
И. В. Сабина*, канд. физ.-мат. наук; Ю. Г. Сидоров*, доктор физ.-мат. наук;
Ф. Ф. Сизов**, член-корреспондент НАНУ; А. О. Сусликов*;
А. Л. Асеев*, академик РАН

* Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: vas@thermo.isp.nsc.ru

** Институт физики полупроводников НАН Украины, г. Киев, Украина

Разработаны, изготовлены и исследованы *n-p*-фотодиодные инфракрасные фотоприемники на основе гибридной сборки фоточувствительных элементов формата 288×4 с шагом 56×43 мкм из гетероэпитаксиальных структур теллурида кадмия и ртути, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, для спектрального диапазона 8–12 мкм и кремниевых мультиплексоров с двунаправленным сканированием, внутренней временной задержкой и накоплением сигнала. Линейчатый фотоприемник формата 288×4 имеет следующие средние значения вольтовой чувствительности, удельной обнаружительной способности и NETD в максимуме чувствительности: $(1-3) \times 10^8$ В/Вт, $(1,5-2,0) \times 10^{11}$ см Гц^{1/2}Вт⁻¹ и 9 мК соответственно. Дефектные каналы отсутствуют.

Ключевые слова: многолинейчатый ИК фотоприемник на основе CdHgTe, кремниевый КМОП-мультиплексор, режим ВЗН, NETD.

Коды OCIS: 160.1898, 040.3060, 230.5160, 230.4170, 310.680.

Поступила в редакцию 18.03.2009.

Введение

В тепловизионных системах используют фотоприемные устройства (ФПУ) на основе охлаждаемых гибридных линейчатых или матричных инфракрасных (ИК) фотоприемников (ФП). Гибридная сборка представляется наиболее технологичным методом изготовления ИК ФП, параметры составных частей которых могут быть оптимизированы независимо друг от друга [1]. Одними из развиваемых и производимых промышленным способом являются ИК ФП на основе гибридных сборок из диодных фоточувствительных элементов, изготовленных на основе эпитаксиальных структур теллурида кадмия и ртути (КРТ), соединенных через индиевые столбы с кремниевыми ПЗС- или КМОП-мультиплексорами [1, 2]. Такие ИК ФП для средневолнового (3–5 мкм) и длинноволнового (8–12 мкм) спектральных диапазонов занимают лидирующее место в развитии и изготовлении тепловизионных систем по сравнению с другими ИК ФП [3].

Успешное развитие метода жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) для обеспечения материалом КРТ позволило провести разработки и организовать производство высококачественных ИК ФП второго поколения, которые должны заменить линейки фоторезисторов. Так, фирма “Sofradir” разработала и выпускает ИК ФП 2-го поколения на основе линейчатых диодных приемников, использующих режим временной задержки и накопления (ВЗН) внутри кремниевых мультиплексоров, формата 288×4 элементов для длинноволнового ИК диапазона спектра [4]. В качестве материала ИК ФП использовались гетероэпитаксиальные слои (ГЭС) КРТ, выращенные методом ЖФЭ на согласованных подложках из теллурида кадмия и цинка. ФПУ на основе линейчатых ИК ФП формата 288×4 обладают высокими, практически близкими к теоретическому пределу, фотоэлектрическими параметрами, ограниченными фоновым излучением. Так, средняя удельная обнаружительная способность составляет $1,9 \times 10^{11}$ см Гц^{1/2} Вт⁻¹ при среднеквадратическом отклонении (СКО)

11,5% в апертуре 0,28 ср при времени накопления 20 мкс и температуре фона 295 К. Среднее значение вольтовой чувствительности составляет $1,72 \times 10^8$ В/Вт (СКО – 12%).

Однако повышение форматов, увеличение потребностей в ИК ФП требуют повышения производительности, снижения затрат и гибкости при создании оптимизированных ГЭС КРТ. Это привело к разработке процессов выращивания слоев КРТ методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на “альтернативных” подложках, которые успешно используются при разработке ИК ФП и конкурируют с ГЭС КРТ ЖФЭ.

Ранее нами была разработана технология изготовления ИК ФП на основе диодных фоточувствительных элементов из ГЭС КРТ МЛЭ, выращенных на подложках из GaAs, которые использовались в составе гибридной сборки с ПЗС-КМОП-мультиплексором с функцией сканирования в одном направлении формата 288×4 [5]. Удельная обнаружительная способность таких ИК ФП для длинноволнового края чувствительности в диапазоне 11,6–12,0 мкм с холодной диафрагмой, обеспечивающей угловую апертуру 64° в горизонтальной плоскости и 32° в вертикальной, при фоновой температуре $T_{\text{ф}} = 295$ К составляла $D_{\lambda}^* \approx 9 \times 10^{10} - 1,8 \times 10^{11}$ см Гц^{1/2} Вт⁻¹.

В практических применениях тепловизионных систем наибольшее распространение получили конструкции сканеров со сканированием “по треугольнику”. Это связано с минимизацией высоких ускорений в точках поворота и, следовательно, с более высоким коэффициентом заполнения K (отношением времени линейного движения сканирующего зеркала к общему времени движения зеркала в одном направлении) и меньшим энергопотреблением. Для таких сканирующих систем ИК ФП должны обеспечить регистрацию излучения и обработку сигналов с двунаправленным сканированием.

В статье представлены данные по разработке линейчатого ИК ФП форматом 288×4 для регистрации излучения в окне прозрачности атмосферы, которое находится в диапазоне 8–12 мкм, на основе ГЭС КРТ, выращенных на подложках (013) CdTe/ZnTe/GaAs с переменным профилем состава по толщине, и КМОП-мультиплексора с двунаправленным сканированием.

Гетероэпитаксиальные структуры

Технология выращивания ГЭС КРТ МЛЭ на подложках из (013) GaAs описана в [6]. Фоточувствительный слой КРТ на границах имеет

широкозонные варизонные слои. После выращивания ГЭС КРТ МЛЭ имеют электронный тип проводимости. Для формирования фотодиодов используются ГЭС КРТ МЛЭ дырочного типа проводимости, получаемого при изотермическом отжиге в инертной атмосфере. Концентрация дырок составляет примерно 8×10^{15} см⁻³, подвижность более 300 см²/В с и время жизни порядка 10 нс.

Фоточувствительный элемент формата 288×4

Линейчатый фоточувствительный элемент (ФЧЭ) формата 288×4 с шагом 56×43 мкм и размером фотодиода 28×25 мкм (аналог ФПУ ID TL015-XX-V3 фирмы “Sofradir”) был изготовлен по планарной технологии, описанной в работе [7]. Фотодиоды получены имплантацией ионов бора с энергией $E \approx 50$ кэВ и дозой 3×10^{13} см⁻² в p -тип ГЭС КРТ МЛЭ. Относительная спектральная характеристика фотодиода приведена на рис. 1а.

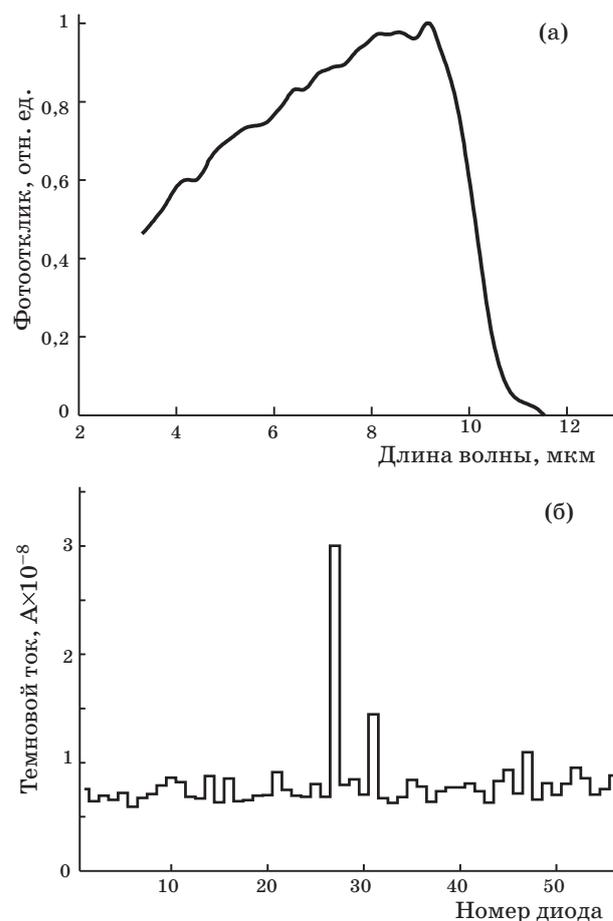


Рис. 1. Спектральная чувствительность отдельных фотодиодов (а) и топограмма темновых токов в случайной выборке по 56 диодам ФЧЭ форматом 288×4 (б). Среднее значение темнового тока 8 нА, СКО – 41%.

Перед гибридной сборкой с мультиплексором ФЧЭ проходили тестирование в микрозондовом устройстве в парах азота. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) по 56 фотодиодам, определенных методом случайной выборки, показали, что среднее значение темнового тока составило примерно 8 нА при обратном напряжении смещения -150 мВ (рис. 16). Большое значение темнового тока (диод № 27 на топограмме) приводит к образованию дефектного элемента. Наличие функции деселекции в КМОП-мультиплексоре позволяет отключить данный диод. Поскольку в одном канале четыре фотодиода, по которым осуществляется ВЗН, то отсутствие одного из них сохраняет работоспособность канала в целом. Кроме этого, в мультиплексоре имеется возможность подстановки вместо нулевого сигнала от дефектного элемента сигнала, равного усредненному по оставшимся рабочим элементам в канале.

На рис. 2 представлены типичная ВАХ и зависимость дифференциального сопротивления

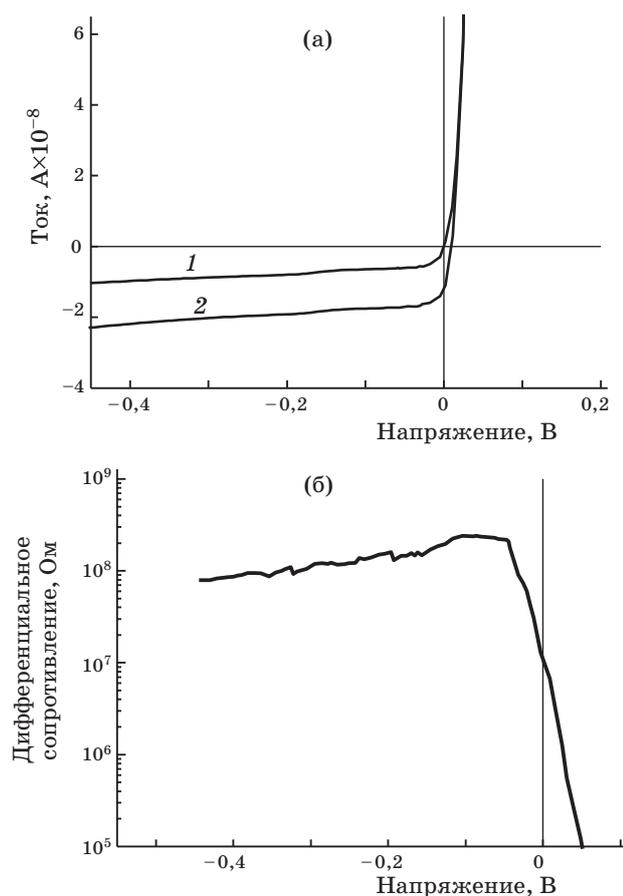


Рис. 2. а – типичные вольт-амперные характеристики: 1 – темновая, 2 – фон 295 К; б – зависимость дифференциального сопротивления от смещения фотодиода. Формат ФЧЭ 288×4.

при температуре 77 К от напряжения смещения. Дифференциальное сопротивление при нулевом смещении и в максимуме составили $1,1 \times 10^7$ Ом и $2,4 \times 10^8$ Ом соответственно. Значение параметра $R_0 A \approx 70$ Ом см². Результаты моделирования механизмов токопереноса таких фотодиодов показали, что темновой ток лимитируется диффузионным током и током типа Шокли-Рида-Холла вне $n-p$ -перехода [8].

Кремниевый КМОП-мультиплексор

Разработанный кремниевый мультиплексор под шифром МКМЗ для ИК ФП формата 288×4 имеет оригинальную схему и конструкцию, особенностями которой являются полностью цифровое управление с помощью параллельного и последовательного портов, деселекция любой дефектной ячейки, реализация функции двунаправленного сканирования, возможность тестирования аналоговых параметров мультиплексора [9].

Мультиплексор изготовлен по серийной одномикронной КМОП-технологии с двумя уровнями металла и двумя уровнями поликремния. Для изготовления использовались 150-миллиметровые пластины кремния 12 Ом/см с ориентацией $\langle 100 \rangle$ [10]. Толщина подзатворного и межслойного окислов составляла соответственно 40 и 90 нм при их удельных емкостях $8,65 \times 10^{-4}$ и $3,8 \times 10^{-4}$ пФ/мкм². В качестве транзистора прямой инжекции использовался n -канальный транзистор с подлегированием, пороговым напряжением порядка 0,7 В и увеличенной до 2,4 мкм длиной канала. Это позволило получить разброс напряжений смещения на диодах не более 10 мВ.

Мультиплексор разбит на четыре идентичных блока по 72×4 каналов, мультиплицируемых на 4 выхода. Блок-схема 1/4 мультиплексора представлена на рис. 3. Триггер деселекции и входное устройство обеспечивают отключение дефектных диодов и 8-кратное изменение коэффициента усиления. Коммутатор обеспечивает переключение направления сканирования и режим прямого доступа к диодам, минуя тракт ВЗН. Зарядо-чувствительный усилитель (ЗЧУ) осуществляет преобразование заряд/напряжение, а устройство выборки-хранения – усиление и запоминание аналогового сигнала на время мультиплексирования.

Одна из основных проблем в стандартной технологии КМОП – реализация функции ВЗН. В данном случае она реализована на одной из раз-

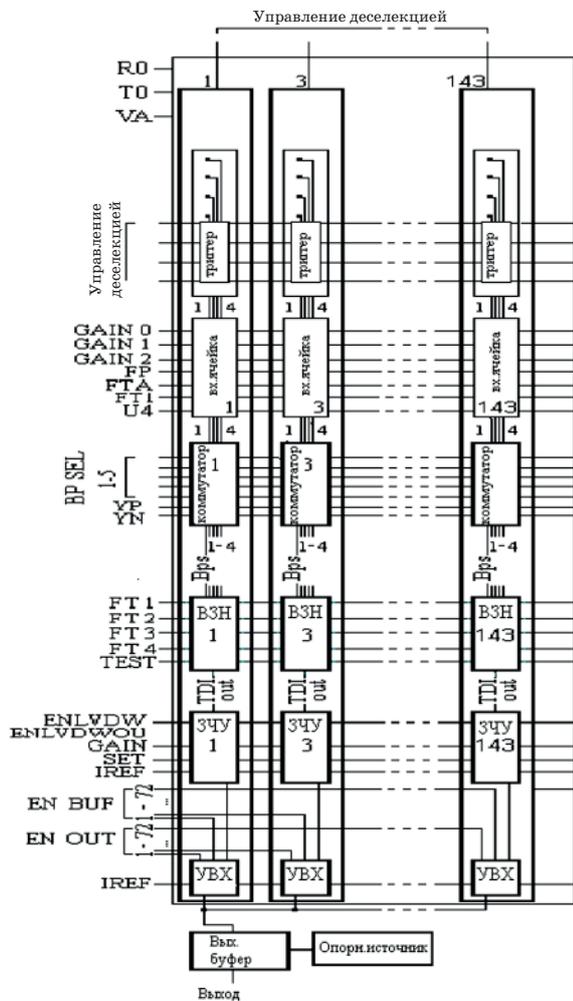


Рис. 3. Развернутая блок-схема 1/4 мультиплексора форматом 288×4 с двунаправленным сканированием.

новидностей ПЗС – “пожарных цепочках” (BVD) [11], которые, несмотря на низкий коэффициент эффективности переноса заряда, практически не изменяются при криогенных температурах. При небольшом количестве переносов (максимум 20 от крайней ячейки) и высоком фоновом сигнале, который создает “жирный ноль”, ослабление сигнала не превышает 3–5% [12]. Для медленных сигналов на параметрах ФП это не сказывается, но при быстроизменяющихся картинках могут происходить некоторое размытие изображения и ухудшение обнаружительной способности на несколько процентов.

Как следует из передаточной характеристики, представленной на рис. 4, зарядовая емкость мультиплексора Q более 2,5 пКл при нелинейности лучше 2%. Внешний вид мультиплексора представлен на рисунке 5а.

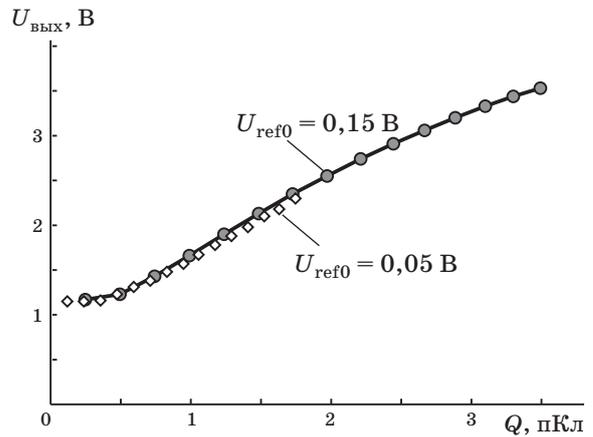


Рис. 4. Передаточная характеристика мультиплексора. $T = 77$ К, тактовая частота $F = 5$ МГц, U_{ref0} – напряжения смещения на фотодиоде.

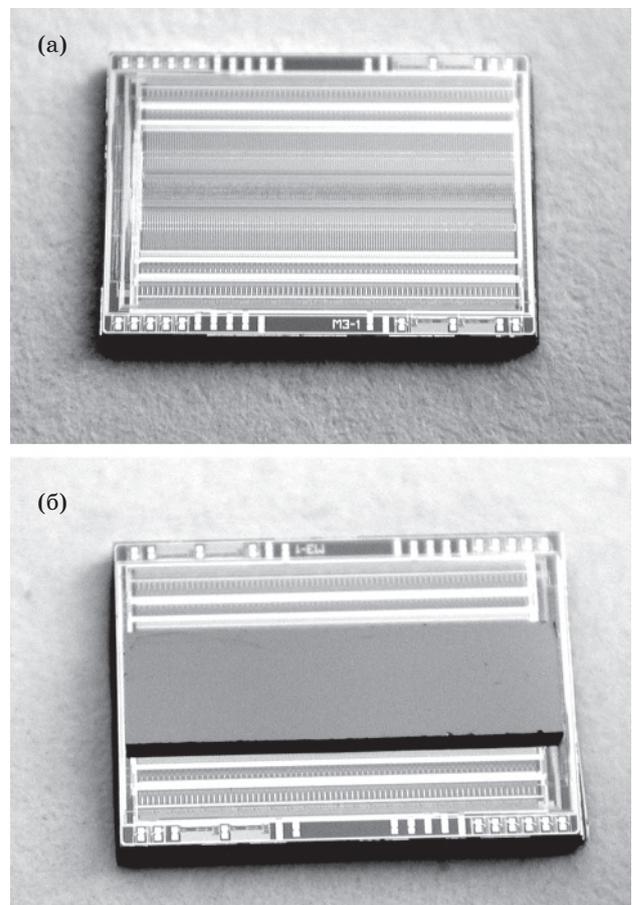


Рис. 5. Внешний вид мультиплексора (а) и гибридной сборки на индиевых столбах (б) ИК ФП форматом 288×4.

Параметры мультиплексора МКМЗ по основным функциональным и электрическим характеристикам близки к параметрам мультиплексора BD TL015-XX-V3 фирмы “Sofradir”, используемого в ФПУ PLUTON LW 288×4 (табл. 1).

Таблица 1. Параметры мультиплексов МКМЗ и BD TL015-XX-V3.

Параметр	Мультиплексор	
	TL015-XX-V3	МКМЗ
Q_{\max} на выходе регистра ВЗН, пКл, не менее	1,29	2,20
Q_{\max} по входу, пКл, не менее	2,58	4,48
Диапазон перестройки входной зарядовой емкости, пКл	0,98–2,00	0,56–4,48
Размах выходного напряжения, В, не менее	2,8	2,8
Динамический диапазон (при отношении сигнал/шум ≥ 1), дБ, не менее	80	70

Характеристики инфракрасного фотоприемника

Гибридная сборка ФЧЭ и кремниевого мультиплексора проводилась методом групповой сварки на индиевых столбах при 120 °С. Суммарная высота индиевых столбов после сборки составляла примерно 10 мкм [13]. На рис. 5б приведен внешний вид гибридной сборки ФЧЭ и мультиплексора.

Измерение параметров ИК ФП проводилось в вакуумном криостате (77 К) при регистрации излучения через подложку из GaAs. Апертурный угол фоновой засветки – 32°, температура фона 295 К, время интегрирования составляло 20 мкс. На рис. 6 представлены топограммы вольтовой чувствительности и удельной обнаружительной способности ИК ФП. Средние значения вольтовой чувствительности и удельной обнаружительной способности каналов в максимуме спектральной чувствительности составили $3,2 \times 10^8$ В/Вт и $2,74 \times 10^{11}$ см Гц^{1/2} Вт⁻¹ соответственно при СКО 7,8% и 11,7%. Характеристики ИК ФП формата 288×4 без дефектных каналов приведены в табл. 2.

Пример теплового изображения формата 576×610 элементов, полученного со сканирующим устройством в режиме двунаправленного сканирования, представлен на рис. 7 (угол поля зрения 32°, относительное отверстие

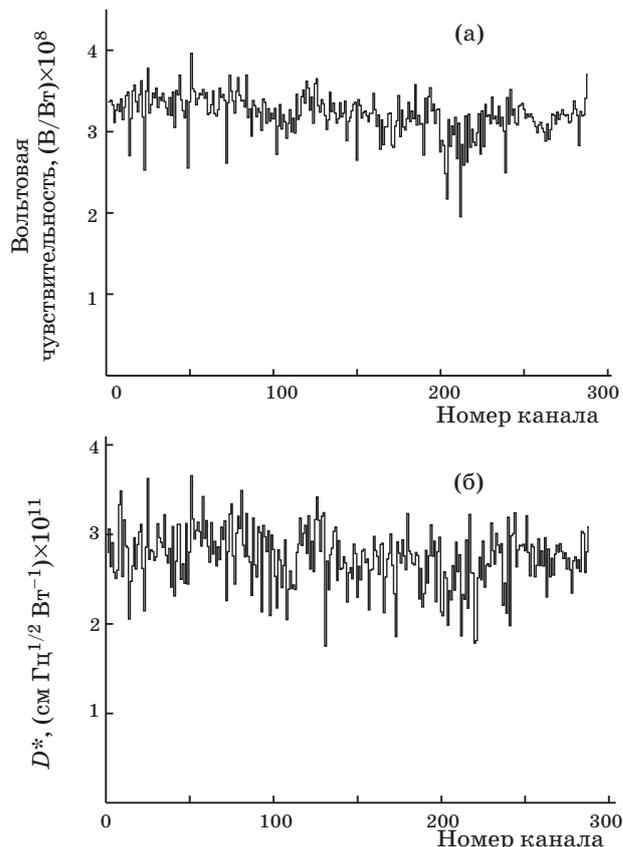


Рис. 6. Топограммы вольтовой чувствительности (а) и удельной обнаружительной способности D^* (б) ИК ФП форматом 288×4. Среднее значение вольтовой чувствительности $3,2 \times 10^8$ В/Вт, СКО – 7,8%; среднее значение $D^* = 2,74 \times 10^{11}$ см Гц^{1/2} Вт⁻¹, СКО – 11,7%.

Таблица 2. Параметры ИК ФП формата 288×4 без дефектных каналов

Параметр	Значение параметра
Длинноволновая граница спектральной чувствительности по уровню 0,5, мкм	10,2
Среднее значение D_{λ}^* по недефектным каналам в максимуме спектральной чувствительности, см Гц ^{1/2} Вт ⁻¹	$2,74 \times 10^{11}$
Минимальное значение D_{λ}^* по недефектным каналам в максимуме спектральной чувствительности, см Гц ^{1/2} Вт ⁻¹	$1,75 \times 10^{11}$
СКО удельной обнаружительной способности каналов, %	11,7
Среднее значение вольтовой чувствительности каналов в максимуме спектральной чувствительности, В/Вт	$3,2 \times 10^8$
СКО вольтовой чувствительности каналов, %	7,8
Количество дефектных каналов, шт	0
Количество соседних дефектных каналов, шт	0



Рис. 7. Пример теплового изображения, полученного с помощью ИК ФП форматом 288×4.

объектива 1:1,6). Температурное разрешение составило 9 мК.

Заключение

Разработан и изготовлен кремниевый мультиплексор по серийной одномикронной КМОП-технологии с двумя уровнями металла и двумя уровнями поликремния с двунаправленным ВЗН-сканированием и деселекцией дефектных элементов.

Изготовлены фотодиодные фоточувствительные элементы формата 288×4 элементов с помощью ионного легирования бором ГЭС КРТ МЛЭ *p*-типа для спектрального диапазона 8–12 мкм. Темновые токи высококачественных фотодиодов составляют 5–10 нА при обратном напряжении смещения –150 мВ и ограничены в основном диффузионным компонентом. Параметр $R_0A \approx 70 \text{ Ом см}^2$.

Методом гибридной сборки на индиевых столбах фоточувствительного фотодиодного элемента и мультиплексора изготовлены образцы ИК ФП. Спектральная чувствительность по уровню 0,5 от максимального значения находится в диапазоне 8–12 мкм. Вольтовая чувствительность и удельная обнаружительная способность в максимуме чувствительности составляют $(2-3) \times 10^8 \text{ В/Вт}$ и $(1,5-3,0) \times 10^{11} \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fossum E., Pain B. Infrared readout electronics for space-science sensors: state of art and future directions // Proc. SPIE. 1994. № 2020. P. 262–285.
2. Tribolet Ph., Hirel Ph., Lussereau A., Vuillermet M. Main results of sofradir IRFPAs including IRCCD and IRCMOS detectors // Proc. SPIE. 1994. № 2252. P. 369–380.
3. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: Пер. с англ. / Под ред. Войцеховского А.В. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
4. Manissadjian A., Tribolet P., Chorier P., Costa P. Sofradir infrared detector products: the past and the future // Proc. SPIE. 2000. V. 4130-58. P. 1–16.
5. Vasiliev V.V., Klimenko A.G., Marchishin I.V., Ovsyuk V.N., Talipov N.Ch., Zahar'yash T.I., Golenkov A.G., Derkach Yu.P., Reva V.P., Sizov F.F., Zabudsky V.V. MCT heteroepitaxial 4×288 FPA // Infrared Physics & Technology. 2004. V. 45. № 1. P. 13–23.
6. Сидоров Ю.Г., Дворецкий С.А., Варавин В.С., Михайлов Н.Н., Якушев М.В., Сабина И.В. Молекулярно-лучевая эпитаксия твердых растворов кадмий-ртуть-теллур на “альтернативных” подложках // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. В. 9. С. 1092–1101.
7. Голенков А.Г., Дворецкий С.А., Есаев Д.Г., Захарьяш Т.И., Клименко А.Г., Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсяк В.Н., Рева В.П., Сидоров Ю.Г., Сизов Ф.Ф., Сусяков А.О., Талипов Н.Х. Фотоприемники на основе гетероэпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ для среднего и дальнего ИК диапазонов // Микроэлектроника. 2002. Т. 31. № 6. С. 414–422.
8. Гуменюк-Сычевская Ж.В., Васильев В.В., Дворецкий С.А., Забудский В.В., Лысюк И.А., Михайлов Н.Н. Механизмы токопереноса фотодиодов на основе ГЭС КРТ МЛЭ для спектрального диапазона 8–12 мкм // Тезисы докл. XX Междунар. научно-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М., 2008. С. 145.
9. Sizov F.F., Derkach Yu.P., Kononenko Yu.G., Reva V.P. Testing of readout device processing electronics for IR linear and focal plane arrays // Proc. SPIE. 1998. V. 1. № 3436. P. 942–948.
10. Sizov F.F., Vasil'ev V.V., Suslyakov A.O., Reva V.P., Golenkov A.G. 4×288 Readouts and FPAs Properties // Optoelectron review. 2006. V. 14. P. 67–74.
11. Sizov F.F., Reva V.P., Derkach Y.P., Vasiliev V.V. Comparative analysis of 4×288 readouts and FPAs // Proc. SPIE. 2005. № 5964. P. 301–308.
12. Janesik J.R. Scientific Charge – Coupled Devices. P.O. box 10, Bellingham, WA. 98227-0010, USA, 2001. P. 920.
13. Vasiliev V.V., Varavin V.S., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Ovsyuk V.N., Sidorov Yu.G., Suslyakov A.O., Yakushev M.V., Aseev A.L. HgCdTe epilayers on GaAs: growth and devices // Opto-electronics review. 2003. V. 11. № 2. P. 99–111.