

УДК 621.383.4

PACS: 07.07.Df, 07.07.-c,
81.05.Dz, 81.65.Rv

Матричные фотоприемные устройства формата 384×288 элементов для ИК-диапазона 8–10 мкм

А. В. Зверев, А. О. Сусяков, И. В. Сабина, Г. Ю. Сидоров, М. В. Якушев, **В. Д. Кузьмин**, В. С. Варавин, В. Г. Ремесник, Ю. С. Макаров, А. В. Предеин, Д. В. Горшков, С. А. Дворецкий, В. В. Васильев, Ю. Г. Сидоров, А. В. Латышев, И. И. Кремис

Разработана конструкция и изготовлены матричные ФЧЭ форматом 384×288 элементов с шагом 25 мкм с длинноволновой границей чувствительности по уровню 0,5 около 9,5 мкм. Средняя величина R_{FA} фотодиодов по всему массиву матрицы равна 100 Ом см². Разработаны схема и топология, по которым изготовлены матричные высокоскоростные мультиплексоры форматом 384×288 элементов с шагом 25 мкм, обеспечивающие рабочие режимы на тактовой частоте до 20 МГц. Методом гибридной сборки на индиевых столбах изготовлено матричное ФПУ форматом 384×288 элементов с шагом 25 мкм с параметрами: средняя величина NETD < 30 мК, количество работоспособных элементов > 97 %. Использование мезатравления для разделения отдельных фотодиодов снижает фотоэлектрическую связь и обеспечивает высокое пространственное разрешение матричного ФПУ, равное 11,25 штр/мм. Представлены примеры использования системы микросканирования для снижения дефектных пикселей в кадре изображения и/или увеличения формата кадров до 768×576. Показано, что в результате использования микросканирования в тепловизионном канале на основе разработанного ФПУ при переходе к формату 768×576 получено улучшение пространственного разрешения в 1,4 раза при одинаковой величине минимально разрешаемой разности температур (MRPT), а MRPT на частоте 0,44 мрад⁻¹ уменьшается с 1,6 К до 0,9 К по сравнению с исходным форматом 384×288.

Ключевые слова: ФЧЭ, КРТ, молекулярно-лучевая эпитаксия, топология, формат, ФПУ, кадровая частота, NETD, микросканирование, MRPT, пространственное разрешение.

Введение

Современное направление развития инфракрасных тепловизионных систем (ИКС) связано с разработкой матричных фотоприемных устройств (ФПУ) для различных спектральных диапазонов.

В интересах повышения дальности обнаружения и распознавания ИКС необходима высокая

чувствительность матриц фотоэлементов, что обеспечивается охлаждением до криогенных температур, и низкая дефектность, которая обеспечивается технологией изготовления матриц фокальной плоскости [1].

Для спектрального диапазона 8–12 мкм ФПУ с такими требованиями разработаны и изготавливаются на основе узкозонного полупроводника

Зверев Алексей Викторович¹, н.с.
Сусяков Александр Олегович¹, вед. инженер.
Сабина Ирина Викторовна¹, с.н.с., к.ф.-м.н.
Сидоров Георгий Юрьевич¹, зав. лабораторией, к.ф.-м.н.
Якушев Максим Витальевич¹, зав. лабораторией, д.ф.-м.н.
Кузьмин Валерий Давыдович¹, вед. инженер.
Варавин Василий Семенович¹, с.н.с., к.ф.-м.н.
Ремесник Владимир Григорьевич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.
Макаров Юрий Сергеевич¹, инженер.
Предеин Александр Владиленович¹, вед. инженер.
Горшков Дмитрий Витальевич¹, зав. отделом, в.н.с., к.ф.-м.н.
Дворецкий Сергей Алексеевич¹, зав. отделом, в.н.с., к.ф.-м.н.
Васильев Владимир Васильевич¹, руководитель группы, с.н.с., к.ф.-м.н.
Сидоров Юрий Георгиевич¹, г.н.с., д.ф.-м.н.

Латышев Александр Васильевич¹, директор ИФП СО РАН, академик РАН.
Кремис Игорь Иванович², зав. отделом, к.т.н.
¹ ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова.
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.
E-mail: vas@isp.nsc.ru
² Филиал ИФП СО РАН «КТИ ПМ».
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 2/1.
E-mail: igor21738@ngs.ru

Статья поступила в редакцию 21 марта 2018 г.

© Зверев А. В., Сусяков А. О., Сабина И. В., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В., **Кузьмин В. Д.**, Варавин В. С., Ремесник В. Г., Макаров Ю. С., Предеин А. В., Горшков Д. В., Дворецкий С. А., Васильев В. В., Сидоров Ю. Г., Латышев А. В., Кремис И. И., 2018

теллурида кадмия и ртути (КРТ). Развитая технология гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) КРТ, выращиваемых методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ, LPE) на согласованных по постоянной решетки подложках из теллурида кадмия и цинка, позволила разработать технологию и создать производство ФПУ различных форматов и обеспечить количество работоспособных элементов более 99,8 %. Развиваемые интенсивно методы выращивания КРТ из паровой фазы с использованием металлоорганических соединений (МОПФЭ, МОСVD) и осаждение из молекулярных пучков (МЛЭ, МПЭ, МВЕ) на подложках из GaAs, Ge и, особенно, из Si позволили обеспечить необходимое качество ГЭС КРТ для ФПУ, по своим характеристикам сравнимым с аналогичными на основе ГЭС КРТ ЖФЭ. Несмотря на существование ФПУ на основе КРТ с мегапиксельным форматом, в настоящее время ФПУ формата 384×288 производятся ведущими фирмами и широко используются в ИК тепловизионных системах [2, 3].

Получение полностью бездефектных ФПУ на основе разработанных технологий выращивания КРТ в настоящее время не представляется возможным. Но задача устранения дефектных пикселей решаются различными приемами [4, 5]. Одним из перспективных и интенсивно развиваемых методов получения бездефектных изображений в

тепловизионных каналах является метод микросканирования [6].

В данной работе представлены результаты разработки конструкции и технологии изготовления матричных ФПУ формата 384×288 элементов с шагом 25 мкм для спектрального диапазона 8–10 мкм с кадровой частотой до 680 Гц и улучшенными функциональными возможностями, отвечающими современным требованиям к матричным ФПУ. Применение системы микросканирования в тепловизионном канале на основе разработанного ФПУ позволяет получить бездефектное изображение в формате 384×288 и/или увеличить формат кадра до 768×576.

Матричные фоточувствительные элементы на основе КРТ

Гетероэпитаксиальные структуры $Cd_xHg_{1-x}Te/CdTe/ZnTe/GaAs(013)$, диаметром 50,8 мм, для спектрального диапазона 8–10 мкм, выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке «Обь-М». Для изготовления матричных фоточувствительных элементов (МФЧЭ) использовалась структура со средней плотностью V-дефектов 626 см^{-2} и характерными размерами 18 ± 3 мкм. Распределение дефектов по площади структуры и гистограмма латеральных размеров дефектов представлены на рис. 1.

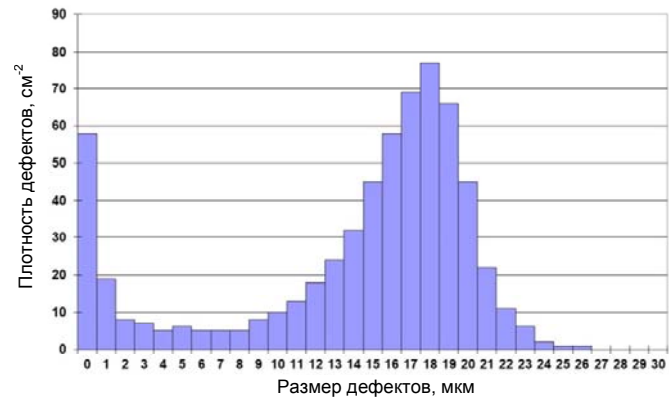
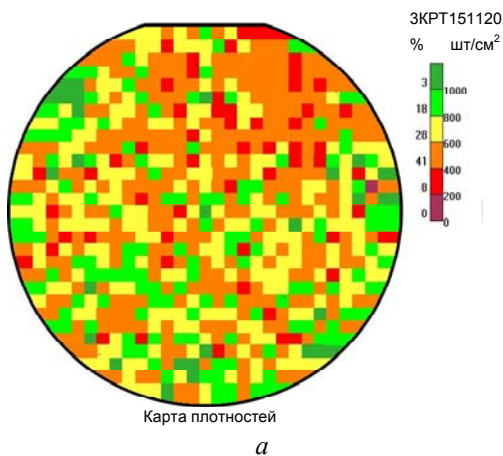


Рис. 1. Распределение плотности V-дефектов по площади структуры (а) и гистограмма латеральных размеров V-дефектов (б).

Базовая технология изготовления фоточувствительных элементов (ФЧЭ) формата 384×288 с шагом 25 мкм включает отжиг гетероэпитаксиальных структур КРТ при 220 °С при минимальном давлении паров ртути для перевода пленок КРТ в вакансионный p -тип проводимости с концентрацией дырок $(5\div 7) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, нанесение пассивирующего диэлектрика, вскрытие окон в диэлектрике, формирование n - p -переходов имплантацией ионов

V^+ через маску из фоторезиста и осаждение индиевых столбов для формирования микроконтактов к областям диодов электронного типа проводимости. Для уменьшения фотоэлектрической связи между элементами применяется мезатравление [7].

В качестве пассивирующего диэлектрика использовался Al_2O_3 , полученный методом атомно-слоевого осаждения [8]. На рис. 2 представлен внешний вид матричного фоточувствительного

элемента форматом 384×288 элементов с шагом 25 мкм.

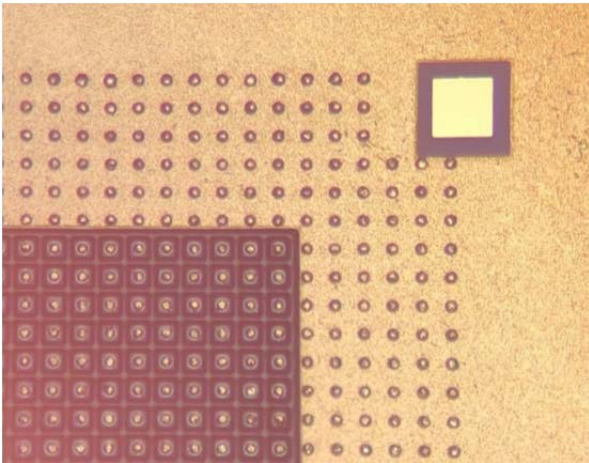


Рис. 2. Угловая часть матричного фоточувствительного элемента форматом 384×288 элементов с шагом 25 мкм с индиевыми столбами.

На рис. 3 представлены зависимости дифференциального сопротивления диодов матричного ФЧЭ при отсутствии теплового излучения. Величина дифференциального сопротивления R_0 при смещениях в диапазоне $-50 \div -400$ мВ постоянная и примерно равна 1 ГОм, а при нулевом смещении – $(2 \div 4) \times 10^7$ Ом. Средняя величина произведения $R_0 A = 100$ Ом см², что соответствует лучшим мировым достижениям [9].

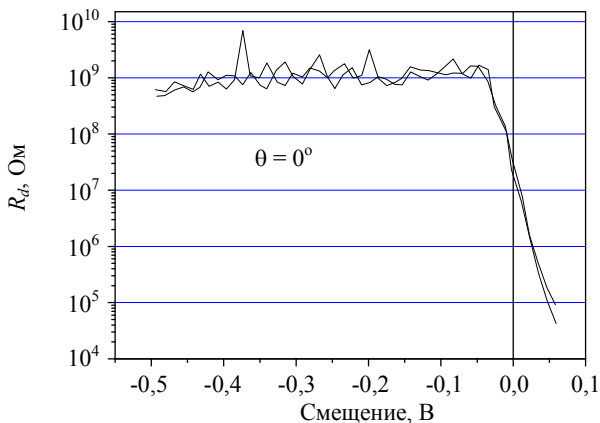


Рис. 3. Дифференциальное сопротивление отдельных элементов МФЧЭ форматом 384×288 .

Длинноволновая граница чувствительности фотодиодов по уровню 0,5 и 0,1 от максимума чувствительности составляет 9,5 мкм и 10 мкм соответственно.

Матричный мультиплексор

Микросхема считывания (мультиплексор) обеспечивает электрические режимы работы мат-

рицы фотодиодов и выполняет мультиплексирование и последовательный вывод видеоинформации. Эта микросхема изготовлена по монокристаллической кремниевой технологии с проектной нормой 0,6 мкм. В табл. 1 представлены основные параметры мультиплексора [10, 11].

Таблица 1

Основные параметры мультиплексора

Наименование параметра	Значение параметра
Формат матрицы ячеек считывания, элементов	384×288
Шаг ячеек считывания, мкм	25
Максимальная зарядовая емкость накопительной ячейки, миллионов электронов, не менее	20
Максимальная частота вывода информации, МГц, не менее	20
Максимальная кадровая частота, Гц, не менее	680
Количество выводов для считывания информации	4

Функциональные возможности мультиплексора:

- возможность вести прием и накопление заряда от фоточувствительных элементов одновременно со считыванием сигнальной информации, полученной в процессе предыдущего акта приема и накопления заряда (режим IWR);

- предусмотрена возможность выбора подматрицы прямоугольной формы произвольного размера и расположения, из которой будет считываться видеосигнал (режим «окна»), минимальный формат – 2×8 элементов;

- предусмотрена возможность выбора величины зарядовой емкости ячейки между двумя фиксированными значениями с помощью интерфейса управления;

- реализованы встроенные цифро-аналоговые преобразователи, которые могут быть использованы для задания напряжения смещения фоточувствительных элементов.

Матричное ФПУ форматом 384×288

На основе матричного фотоприемника (МФП), представляющего гибридную сборку мультиплексора с матричным ФЧЭ, изготовлено матричное фотоприемное устройство (ФПУ). Данное ФПУ состоит из МФП, установленного в вакуумный криостатированный корпус (ВКК), интегрально сопряженный с микрокриогенной системой (МКС). В качестве МКС используется газовая криогенная машина Стирлинга с линейным приводом типа МСМГ-0,5В-0,5/80 КВО.0751.000К

производства ООО «НТК «Криогенная техника» (г. Омск). На рис. 4 представлен внешний вид ФПУ.



Рис. 4. Внешний вид матричного ФПУ формата 384×288 элементов.

Основные эксплуатационные характеристики ФПУ на базе МФП формата 384×288 элементов приведены в табл. 2.

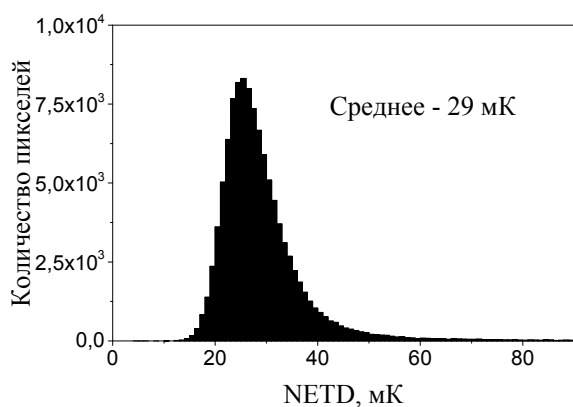
На рис. 5 представлены гистограмма NETD и топограмма дефектных элементов матричного ФПУ.

Параметры разработанного матричного ФПУ форматом 384×288 элементов с шагом 25 мкм в сравнении с параметрами соответствующих аналогичным ФПУ, изготавливаемых зарубежными фирмами приведены в табл. 3.

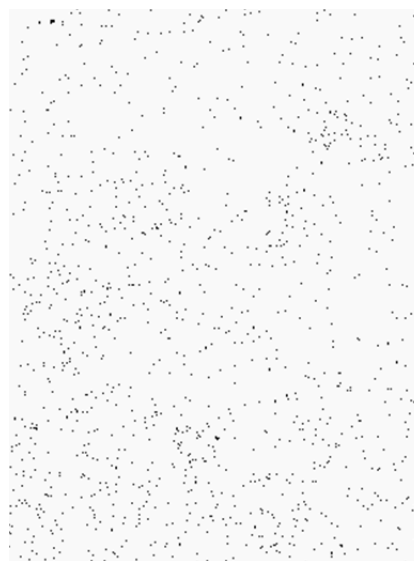
Таблица 2

Основные эксплуатационные характеристики ФПУ

Наименование параметра	Значение параметра
Формат ФПУ, элементов	384×288
Шаг фоточувствительных элементов, мкм	25
Диафрагменное число	F/2
Разность температур, эквивалентная шуму, NETD, мК	30
Работоспособных элементов с NETD < 90 мК, %	> 97
Спектральный диапазон:	
– длинноволновый край по критерию 0,5, мкм	9,5
– длинноволновый край по критерию 0,1, мкм	10,0
Максимальная частота вывода информации, МГц, не менее	20
Максимальная кадровая частота, Гц, не менее	680
Количество выводов для считывания информации	4
Время выхода на рабочий температурный режим в НКУ, мин	6
Потребляемая мощность в НКУ:	
– при выходе на рабочий режим, Вт	24
– в рабочем режиме, Вт	11



а



б

Рис. 5. Характеристики ФПУ: а) гистограмма NETD; б) топограмма дефектных элементов (черные пиксели) ФПУ форматом 384×288 элементов. Неприсоединенных элементов менее 0,01 % (10 шт.). Всего дефектных элементов – 2,54 %.

Таблица 3

Сравнительные характеристики различных ФПУ

Фирма, страна изготовитель	SOFRADIR, Франция [12]	AIM INFRAROT-MODULE, Германия [13]	ИФП СО РАН, Россия
Формат	384×288	384×288	384×288
Шаг, мкм	25	24	25
Спектральный диапазон, мкм	7,7÷9,5	6÷9	7,7÷9,5
NETD, мК	≤ 17	≤ 25	< 30
Максимальная частота кадров, Гц	280 (4 выхода)	120 (2 выхода)	680 (4 выхода)
Количество работоспособных элементов, %	≥ 99,5	–	> 97

Разделение элементов ФЧЭ путем мезатравления улучшает пространственное разрешение ФПУ формата 384×288 элементов. На рис. 6 приведена функция передачи модуляции (MTF), пространственное разрешение при контрасте 0,5 составляет ~11,25 штр/мм.

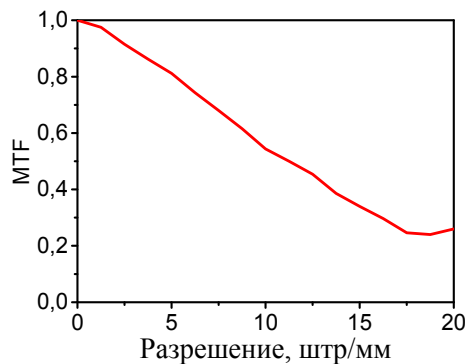
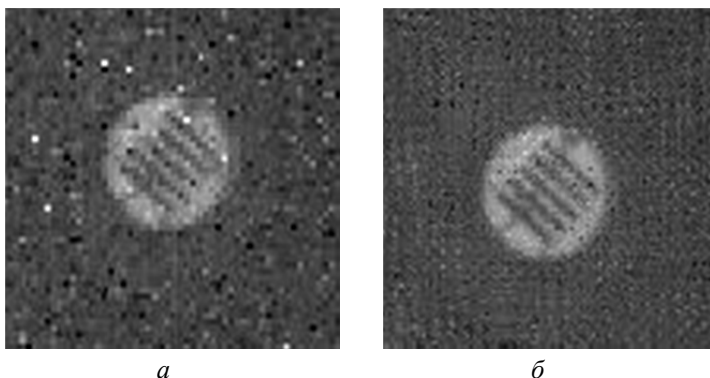


Рис. 6. Функция передачи модуляции MTF матричного ФПУ форматом 384×288. Объектив F/2.

Микросканирование

Метод фильтрации остаточной неоднородности чувствительности (ОНЧ) и дефектов изображения в матричных тепловизорах на основе частотного разложения и с использованием микросканирования предназначен для использования в тепловизорах, осуществляющих двухточечную схему коррекции выходного сигнала фотоприемника [14].



Метод коррекции был опробован в тепловизионных каналах на базе ФПУ 384×288 с шагом фоточувствительных элементов 25 мкм. В каналах использовался микросканер с электромагнитным приводом на основе смещения оптического компонента с шагом микроперемещения проекции изображения до 150 мкм, причем для каждого канала устанавливалась величина микроперемещения 5 пикселей [15].

Применение метода позволило полностью удалить остаточную неоднородность и дефекты из изображения [14].

С помощью микросканера можно получить увеличенный формат изображения. Для этого используется шаг микросканирования, равный половине шага матрицы в X и Y направлениях. В этом случае формат изображения увеличивается в 4 раза и составляет 768×576. При этом кадровая частота снижается тоже в 4 раза.

На рис. 7 приведены изображения мира в формате 384×288 элементов без применения микросканирования и в формате 768×576 элементов с использованием микросканирования на половину шага фотоприемной матрицы. Мира на рис. 7 специально расположена под углом к осям фотоприемной матрицы, что позволяет показать эффект увеличения разрешения с использованием микросканирования (рис. 7, б) при сравнении с изображением мира (тоже расположенной под углом), показанной на рис. 7, а. Видна пиксельность изображения мира без микросканирования и сглаживание ступенек при увеличении разрешения с использованием микросканирования.

Рис. 7. Изображения мира, полученные в двух режимах съемки: а) с размером кадра 384×288 элементов без микросканирования; б) с размером кадра 768×576 элементов с использованием микросканирования. Мира расположена под углом в центре кадра.

Для исследования зависимости минимальной разрешимой разности температур (МРРТ) от пространственной частоты были проведены измерения частотно-контрастных характеристик (ЧКХ) тепловизионного канала на основе изготовленного ФПУ без микросканирования и с микросканированием (шаг сканирования равен половине шага матрицы). В результате измерений получено, что с переходом к формату 768×576 пространственное разрешение при значении МРРТ, равном 0,9 К, увеличивается с 0,31 мрад⁻¹ до 0,44 мрад⁻¹, а величина МРРТ на частоте 0,44 мрад⁻¹ улучшается в ~ 1,8 раза с 1,6 К до 0,9 К по сравнению с исходным форматом 384×288.

Заключение

Разработана оптимальная конструкция и изготовлены матричные ФЧЭ форматом 384×288 элементов с шагом 25 мкм с длинноволновой границей чувствительности по уровню 0,5 около 9,5 мкм. Средняя величина параметра R_0A фотодиодов по всему массиву матрицы равна 100 Ом см², что соответствует лучшим мировым достижениям. Использование мезатравления для разделения отдельных фотодиодов снижает фотоэлектрическую связь и обеспечивает высокое пространственное разрешение матричного ФПУ, равное 11,25 штр/мм с контрастом 0,5.

Разработана схема и топология, по которым изготовлены матричные высокоскоростные мультиплексоры форматом 384×288 элементов с шагом 25 мкм, обеспечивающие рабочие режимы на тактовой частоте до 20 МГц.

Разработанный нами ФПУ выделяется среди существующих аналогов высокой максимальной кадровой частотой (680 Гц), что позволяет использовать системы микросканирования в тепловизионных каналах для улучшения параметров. Применение метода микросканирования по 4-м элементам (шаг сканирования равен шагу матрицы) позволит полностью удалить остаточную неоднородность и дефекты из изображения с форматом кадра 384×288 элементов, причем при максимальной кадровой частоте до 170 Гц.

В результате использования микросканирования в тепловизионном канале на основе ФПУ форматом 384×288 получено улучшение ЧКХ. С переходом к формату 768×576 пространственное разрешение при значении МРРТ равном 0,9 К увеличивается с 0,31 мрад⁻¹ до 0,44 мрад⁻¹, а величина МРРТ на частоте 0,44 мрад⁻¹ уменьшается с 1,6 К до 0,9 К по сравнению с исходным форматом 384×288.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A. Infrared Detectors. Second edition. – CRS Press. Taylor&Fransis Group. 2011.
2. Breiter R., Figgemeier H., Lutz H., Wendler J., Rutzinger S., Schallenberg T. // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9451. P. 945128.
3. Cervera C., Baier N., Gravrand O., Mollard L., Lobre C., Desteñanis G., Zanatta J. P., Boulade O., Moreau V. // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9451. P. 945129.
4. Борзов С. М., Козик В. И., Потатуркин О. И. // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 6. С. 11.
5. Жезалов С. И., Соляков В. Н., Фетюхина В. Г. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 80.
6. Rainer Breiter, Tobias Ihle, Joachim C. Wendler, Holger Lutz, Stefan Rutzinger, Timo Schallenberg, Karl C. Hofmann, Johann Ziegler // Optical Engineering. 2011. Vol. 50. No. 6. P. 061010.
7. Предеин А. В., Сидоров Ю. Г., Сабинаина И. В., Васильев В. В., Сидоров Г. Ю., Марчишин И. В. // Автотметрия. 2013. Т. 49. № 5. С. 78.
8. Kovchavtsev A. P., Sidorov G. Yu., Nastovjak A. E., Tsarenko A. V., Sabinina I. V., Vasilyev V. V. // J. Appl. Phys. 2017. Vol. 121. P. 125304.
9. Rogalski A. // Progress in Quantum Electronics. 2012. Vol. 36. P. 342.
10. Zverev A. V., Makarov Yu. S., Mikhantiev E. A., Sabinina I. V., Sidorov G. Yu., Dvoretzkiy S. A. // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 643. P. 012055.
11. Dvoretzkiy S. A., Zverev A. V., Makarov Yu. S., Mikhantiev E. A. / Proc. 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, June 29 2015-July 3 2015. P. 302–305.
12. VENUS-LW 384×288 – 25 μm pitch – MCT, www.sofradir.com
13. MCT matrix array-LW 384×288 – 24 μm pitch, www.aim-ir.com
14. Кремис И. И., Толмачев Д. А., Гладков Р. А. // Прикладная физика. 2017. № 1. С. 58.
15. Кремис И. И., Моисеев В. А., Шатунов К. П., Ульянова Е. О., Гладков Р. А., Горшков А. А. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 2. С. 189.

LWIR 384×288 FPA for the infrared range of 8–10 μm

A. V. Zverev¹, A. O. Suslyakov¹, I. V. Sabinina¹, G. Yu. Sidorov¹, M. V. Yakushev¹, V. D. Kuzmin¹,
V. S. Varavin¹, V. G. Remesnik¹, Yu. S. Makarov¹, A. V. Predein¹, D. V. Gorshkov¹, S. A. Dvoretzkiy¹,
V. V. Vasil'ev¹, Yu. G. Sidorov¹, A. V. Latyshev¹, and I. I. Kremis²

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS
13 Lavrentieva pr., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: vas@isp.nsc.ru

² KTI PM Branch of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS
2/1 Lavrentieva pr., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: igor21738@ngs.ru

Received March 21, 2018

The 384×288 FPAs with 25 μm pitch and 9.5 μm cut-off wavelength were designed and fabricated. The mean R_0A value across the whole array is 100 Ohm cm². The circuit and topology were designed and high-speed 384×288 multiplexers with 25 μm pitch were fabricated, providing the operating mode on the clock frequency up to 20 MHz. By means of indium bumps hybrid assembly the 384×288 photodetector was fabricated with following parameters: mean NETD value <30 mK, the functional elements percent >97 %. The paper provides examples of micro-scanning system use for reduction of amount of defect pixels in the image frame and/or photodetector format upgrade to 768×576 elements. It is shown that use of the micro-scanning in the IR channel based on the designed photodetector at upgrading to the 768×576 format leads to the improvement of the space resolution by ratio 1.4 at the same value of minimal resolvable temperature difference (MRTD).

Keywords: FPA, MCT, MBE, frame rate, NETD, micro-scanning, MTF.

REFERENCES

1. A. Rogalski, *Infrared Detectors. Second Edition*. (CRS Press. Taylor&Fransis Group, 2011).
2. R. Breiter, H. Figgemeier, H. Lutz, J. Wendler, S. Rutzinger, and T. Schallenberg, *Proc. SPIE* **9451**, 945128 (2015).
3. C. Cervera, N. Baier, O. Gravrand, L. Mollard, C. Lobre, G. Destefanis, J. P. Zanatta, O. Boulade, and V. Moreau, *Proc. SPIE* **9451**, 945129 (2015).
4. S. M. Borzov, V. I. Kozik, and O. I. Potaturkin, *Izv. Vuzov. Priborostroenie* **52** (6), 11 (2009).
5. S. I. Zheglov, V. N. Solakov, and V. G. Phetyuchina, *Prikl. Fiz. No. 2*, 80 (2011).
6. Rainer Breiter, Tobias Ihle, Joachim C. Wendler, Holger Lutz, Stefan Rutzinger, Timo Schallenberg, Karl C. Hofmann, and Johann Ziegler, *Optical Engineering* **50** (6) 061010 (2011).
7. A. V. Predein, Yu. G. Sidorov, I. V. Sabinina, V. V. Vasil'ev, G. Yu. Sidorov, and I. V. Marchishin, *Avtometriya* **49** (5), 78 (2013).
8. A. P. Kovchavtsev, G. Yu. Sidorov, A. E. Nastovjak, A. V. Tsarenko, I. V. Sabinina, and V. V. Vasilyev, *J. Appl. Phys.* **121**, 125304 (2017).
9. A. Rogalski, *Progress in Quantum Electronics* **36**, 342 (2012).
10. V. Zverev, Yu. S. Makarov, E. A. Mikhantiev, I. V. Sabinina, G. Yu. Sidorov, and S. A. Dvoretzkiy, *Journal of Physics: Conference Series* **643**, 012055 (2015).
11. S. A. Dvoretzkiy, A. V. Zverev, Yu. S. Makarov, and E. A. Mikhantiev, in *Proc. 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, (June 29, 2015-July 3, 2015). P. 302.
12. VENUS-LW 384×288 – 25 μm pitch – MCT, www.sofradir.com
13. MCT matrix array-LW 384×288 – 24 μm pitch, www.aim-ir.com
14. I. I. Kremis, D. A. Tolmachev, and R. A. Gladkov, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 58 (2017).
15. I. I. Kremis, V. A. Moiseev, K. P. Shatunov, E. O. Ul'yanova, R. A. Gladkov, and A. A. Gorshkov, *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (2), 189 (2017).