

УДК 621.383.4

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

Матричное фотоприемное устройство формата 640×512 элементов на основе HgCdTe для средневолнового ИК-диапазона

И. В. Марчишин, И. В. Сабина, Г. Ю. Сидоров, М. В. Якушев, В. С. Варавин, В. Г. Ремесник, А. В. Предеин, С. А. Дворецкий, В. В. Васильев, Ю. Г. Сидоров, Д. В. Марин, А. П. Ковчавцев, А. В. Латышев

Разработана конструкция и изготовлены матричные ФЧЭ на основе полупроводникового твердого раствора HgCdTe на подложках из кремния форматом 640×512 элементов с шагом 25 мкм с длинноволновой границей чувствительности 5 мкм по уровню 0,5. Разработаны схема и топология, по которым изготовлены матричные мультиплексоры форматом 640×512 элементов с шагом 25 мкм, обеспечивающие рабочие режимы на тактовой частоте до 10 МГц. Методом гибридной сборки на индиевых столбах изготовлено матричное ФПУ форматом 640×512 элементов с шагом 25 мкм. Лучшие образцы ФПУ характеризуются следующими параметрами: средняя величина NETD < 13 мК, количество работоспособных элементов > 99,5 %.

Ключевые слова: КРТ, молекулярно-лучевая эпитаксия, ФЧЭ, мультиплексор, ФРА, ФПУ, NETD, SWaP.

Ссылка: Марчишин И. В., Сабина И. В., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В., Варавин В. С., Ремесник В. Г., Предеин А. В., Дворецкий С. А., Васильев В. В., Сидоров Ю. Г., Марин Д. В., Ковчавцев А. П., Латышев А. В. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 114.

Reference: I. V. Marchishin, I. V. Sabinina, G. Yu. Sidorov, M. V. Yakushev, V. S. Varavin, V. G. Remesnik, A. V. Predein, S. A. Dvoretzky, V. V. Vasil'ev, Yu. G. Sidorov, D. V. Marin, A. P. Kovchavtsev, and A. V. Latyshev, *Usp. Prikl. Fiz.* 7 (2), 114 (2019).

Введение

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

Доминирование на рынке ИК-приборов на основе прямозонных полупроводников с перестраиваемой шириной запрещенной зоны будет усиливаться из-за следующих требований к перспективным ИК-фотоприемникам (ФП) [1, 2]:

– более высокая рабочая температура, в конечном итоге, неохлаждаемые ИК ФП;

Марчишин Игорь Владимирович, с.н.с.
Сабина Ирина Викторовна, с.н.с., к.ф.-м.н.
Сидоров Георгий Юрьевич, зав. лаб., к.ф.-м.н.
Якушев Максим Витальевич, зав. лаб., д.ф.-м.н.
Варавин Василий Семенович, с.н.с., к.ф.-м.н.
Ремесник Владимир Григорьевич, с.н.с., к.ф.-м.н.
Предеин Александр Владиленович, вед. инженер.
Дворецкий Сергей Алексеевич, зав. отделом, в.н.с., к.ф.-м.н.
Васильев Владимир Васильевич, руководитель группы, с.н.с., к.ф.-м.н.
Сидоров Юрий Георгиевич, гл.н.с., д.ф.-м.н.
Марин Денис Викторович, н.с., к.ф.-м.н.

Ковчавцев Анатолий Петрович, зав. лаб., д.ф.-м.н.
Латышев Александр Васильевич, директор, академик РАН.
ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова.
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.
E-mail: vas@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2019 г.

© Марчишин И. В., Сабина И. В., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В., Варавин В. С., Ремесник В. Г., Предеин А. В., Дворецкий С. А., Васильев В. В., Сидоров Ю. Г., Марин Д. В., Ковчавцев А. П., Латышев А. В., 2019

- большие форматы ИК ФП;
- более высокая частота кадров и более короткое время интегрирования;
- мультиспектральные ИК ФП.

Особое значение для снижения стоимости тепловизионной системы и повышения ее мобильности и гибкости имеет требование более высоких рабочих температур и движение в сторону неохлаждаемых ФПУ для всех длин волн. Этим требованием лучше всех удовлетворяют ИК ФП на основе полупроводникового твердого раствора теллурида кадмия и ртути (КРТ, CdHgTe) с перестраиваемой шириной запрещенной зоны. Так, в работе [1] сравниваются зависимости темнового тока от температуры для ИК-приемников средневолнового диапазона 3–5 мкм на основе QWIP, InSb и четырех различных архитектур на основе CdHgTe с $n+/n-/p$ гомопереходами, имеющими вакансионное, внешнее, а также смешанное легирование материала базы p -типа, а также с $p+/n$ двухслойными гетеропереходами (DLHJ). Сравнение показывает очевидное преимущество ИК ФП на основе КРТ. При моделировании с одинаковой запрещенной зоной 0,25 эВ для всех температур VLIP-режим при $F/2$ возможен при 110 К для QWIP, при 115 К для InSb, при 150 К, 160 К, 178 К для КРТ с вакансионным, смешанным и внешним легированием базы p -типа, соответственно, и при 178 К для DLHJ.

До недавнего времени ИК ФП на основе КРТ имели более высокий процент дефектных пикселей, которые снижали качество инфракрасного изображения. В настоящее время работоспособность элементов ИК ФП на основе КРТ составляет 99,9 %, что равно или лучше, чем InSb [3].

Использование подложек из Si для выращивания слоев КРТ очень привлекательно для изготовления ИК-матриц фокальной плоскости (FPA), потому что они дешевле чем подложки из CdZnTe (стоимость 6-дюймовых Si-подложек составляет 100 долларов США и подложек CdZnTe размером 7×7 см 10 000 долларов США). Значительные преимущества структур CdHgTe/Si очевидны:

- становятся доступны пластины большой площади,
- микросборка матричных ФЧЭ на кремниевых подложках с кремниевыми мультиплек-

сором большого формата имеет долгосрочную надежность при термоциклировании.

Несмотря на большое несоответствие параметров решетки (19 %) и большую разность коэффициентов термического расширения (80 %) между CdTe и Si, метод МЛЭ успешно используется для гетероэпитаксиального роста CdHgTe для фотодиодов средневолнового спектрального диапазона 3–5 мкм на композитных подложках CdTe/Si [4].

По сравнению с детекторами на основе InSb длинноволновая граница чувствительности детекторов на основе CdHgTe может быть подстроена под заданный спектральный отклик с помощью изменения состава твердого раствора. Кроме того, благодаря положительному коэффициенту изменения ширины запрещенной зоны от температуры в области длин волн 3–5 мкм они могут быть использованы в более широком температурном интервале (вплоть до $T > 180$ К, см., например, [5]) по сравнению с детекторами InSb, что важно с точки зрения условий охлаждения.

В данной работе представлены результаты разработки технологии выращивания слоев CdHgTe на кремниевых подложках для спектрального диапазона 3–5 мкм и изготовления матричных фоточувствительных элементов (ФЧЭ) форматом 640×512 и с шагом 25 мкм на их основе. Разработана конструкция и технология изготовления матричных ФПУ формата 640×512 элементов с шагом 25 мкм для спектрального диапазона 3–5 мкм с кадровой частотой до 100 Гц и улучшенными функциональными возможностями, отвечающими современным требованиям к матричным ФПУ. Для лучших образцов ФПУ средняя величина ЭШРТ (разность температур эквивалентная шуму, NETD) < 13 мК, количество работоспособных элементов > 99,5 %.

Матричные фоточувствительные элементы на основе КРТ

Гетероэпитаксиальные структуры Cd_xHg_{1-x}Te/CdTe/ZnTe/Si(013), диаметром 76,2 мм, для спектрального диапазона 3–5 мкм, выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке «Обь-М» [6] с помощью разработанного технологического процесса, детали

которого приведены в [7]. In situ контроль процессов предэпитаксиальной подготовки и роста осуществлялся с помощью дифракции быстрых электронов (ДБЭ) и одноволновой эллипсометрии (длина волны $\lambda = 632,8$ нм). Для изготовления матричных фоточувствительных элементов использовалась структура

со средней плотностью V-дефектов 979 см^{-2} и характерными размерами 4–11 мкм. Распределение плотности V-дефектов по площади гетероэпитаксиальной структуры $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{Si}(013)$ и гистограмма латеральных размеров представлены соответственно на рис. 1, а, б.

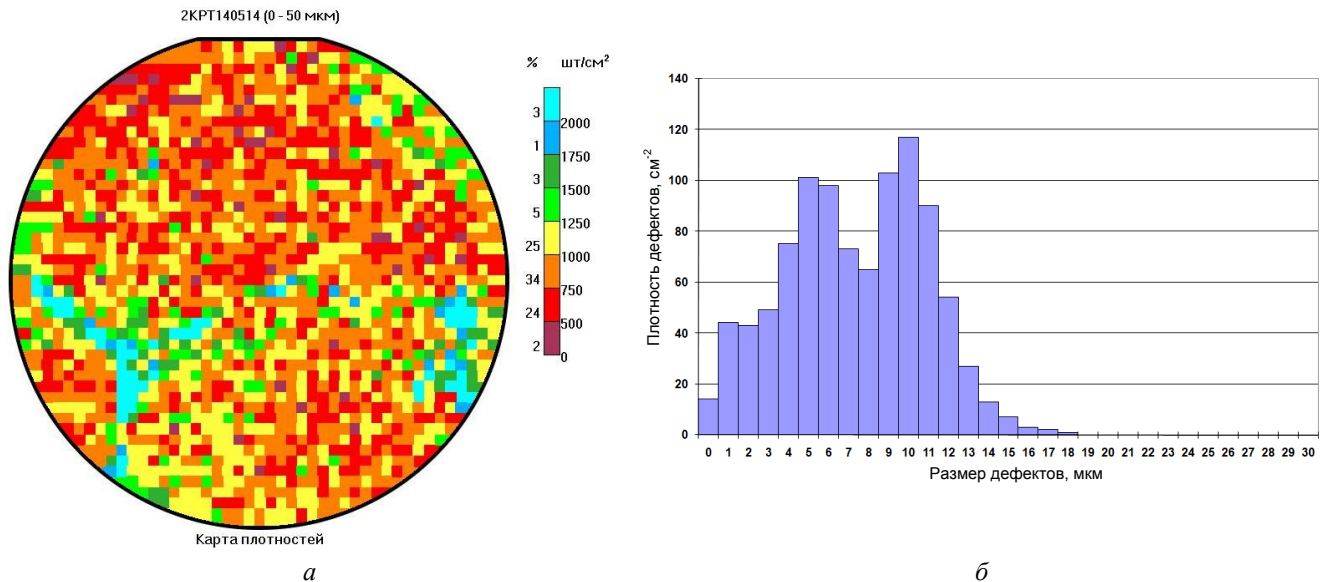


Рис. 1. Характеристики ФЧЭ: а) – распределение плотности V-дефектов по площади гетероэпитаксиальной структуры $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{Si}(013)$; б) – гистограмма латеральных размеров V-дефектов.

Толщина слоя КРТ составляла 7,5 мкм, состав $x = 0,295$. На границах фоточувствительного слоя КРТ выращивались варизонные широкозонные слои с увеличением состава до $x \sim 0,5$ к поверхности для снижения влияния поверхностной рекомбинации на время жизни неосновных носителей, что отражено на рис. 2.

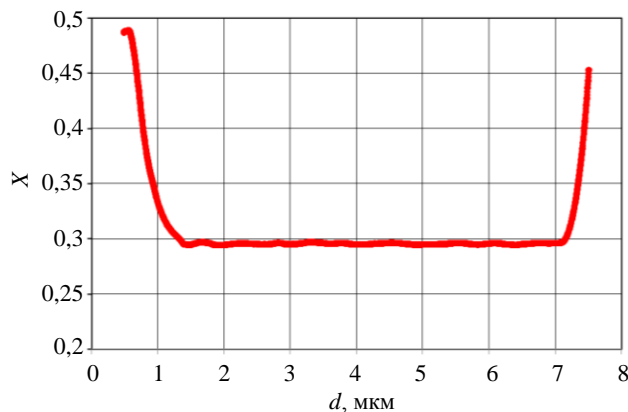


Рис. 2. Распределение состава x гетероэпитаксиальной структуры $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{Si}(013)$ по толщине d .

Базовая технология изготовления ФЧЭ формата 640×512 с шагом 25 мкм включает:

- термический отжиг гетероэпитаксиальных структур КРТ при 220°C для конверсии типа проводимости слоев КРТ в вакансионный p -тип 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 B^+ через маску из фоторезиста;
- осаждение индиевых столбов для формирования микроконтактов к областям диодов электронного типа проводимости [8].

В качестве пассивирующего диэлектрика использовался Al_2O_3 , полученный методом атомно-слоевого осаждения [9].

Длинноволновая граница чувствительности фотодиодов S по уровню 0,5 от максимума чувствительности составляет 5,2 мкм (см. рис. 3).

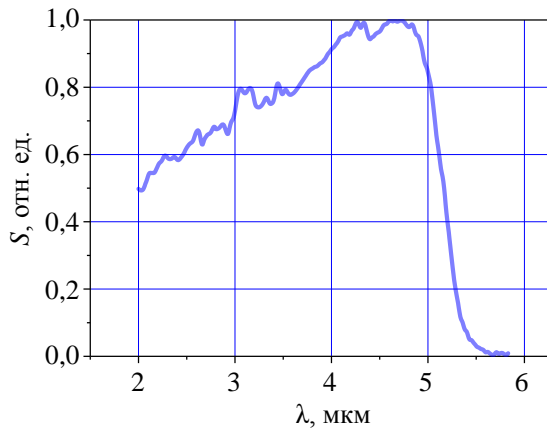


Рис. 3. Относительная спектральная зависимость чувствительности S фотодиодов в матрице.

Вольт-амперные характеристики элементов матриц были измерены электрометром

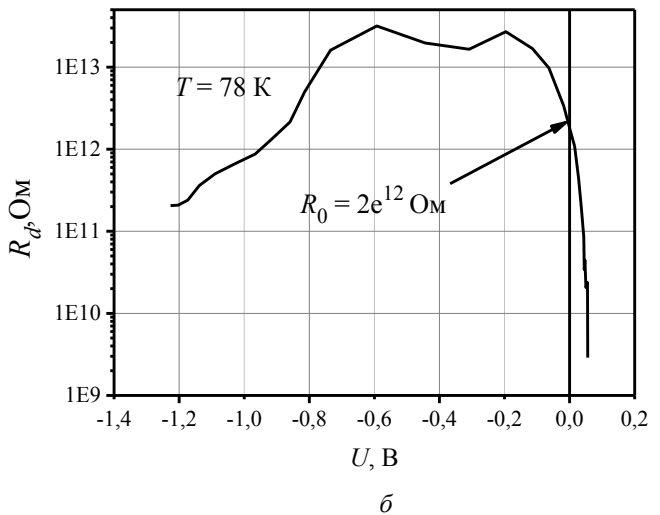
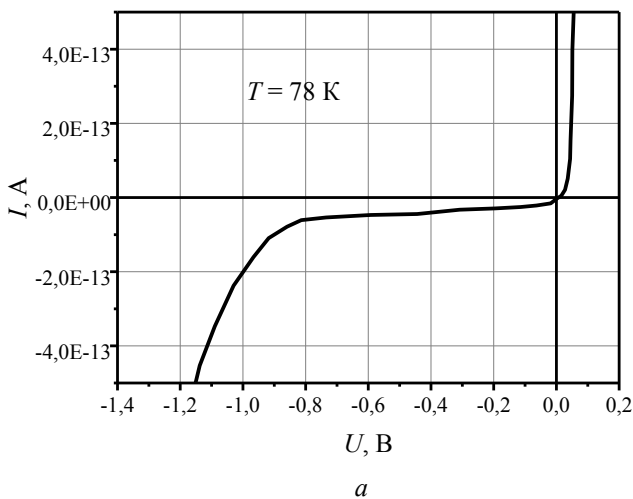


Рис. 4. Характеристики элементов матриц: а – типичная ВАХ элемента матрицы формата 640×512 при температуре 78 К; б – зависимость дифференциального сопротивления R_d от напряжения смещения U .

Матричный мультиплексор

Кремниевый мультиплексор обеспечивает необходимый электрический режим работы элементов фотоприёмной матрицы, выполняет накопление сигналов с фотодиодов, мульти-

плексирование и последовательный вывод видеоинформации. Эта микросхема изготовлена по монолитной кремниевой технологии КМОП с проектной нормой 0,6 мкм. В таблице представлены основные параметры мультиплексора.

Таблица

Параметры кремниевого мультиплексора

Наименование параметра	Значение параметра
Формат матрицы ячеек считывания, элементов	640×512
Шаг ячеек считывания, мкм	25
Максимальная зарядовая емкость накопительной ячейки, миллионов электронов, не менее	33
Максимальный динамический диапазон по выходу, дБ, не менее	77
Максимальная частота вывода информации, МГц, не менее	10
Максимальная кадровая частота, Гц, не менее	100
Количество выводов для считывания информации	4

Функциональные возможности мультиплексора:

- прием и накопление заряда от фоточувствительных элементов в режиме «мгновенного снимка» («Snap Shot»);
- управление режимами работы и подстройка цепей смещения аналоговой части СБИС мультиплексора через последовательный интерфейс;
- предусмотрено управление коэффициентом передачи зарядочувствительных усилителей в диапазоне 0,5–2,0 В/пКл;
- предусмотрена возможность выбора подматрицы прямоугольной формы произвольного размера и расположения, из которой будет считываться видеосигнал (режим «окна»), минимальный формат – 1 строка × 4 столбца.

Матричное ФПУ форматом 640×512

На основе матричного ИК ФП, представляющего гибридную сборку мультиплексора с матричным ФЧЭ, изготовлено матричное фотоприемное устройство (ФПУ). ФПУ состоит из матричного ИК ФП, 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-0,6А-0,4/80 МКСО КВО.0748.000 производства ООО «НТК «Криогенная техника» (г. Омск). На рис. 5 представлен внешний вид ФПУ.

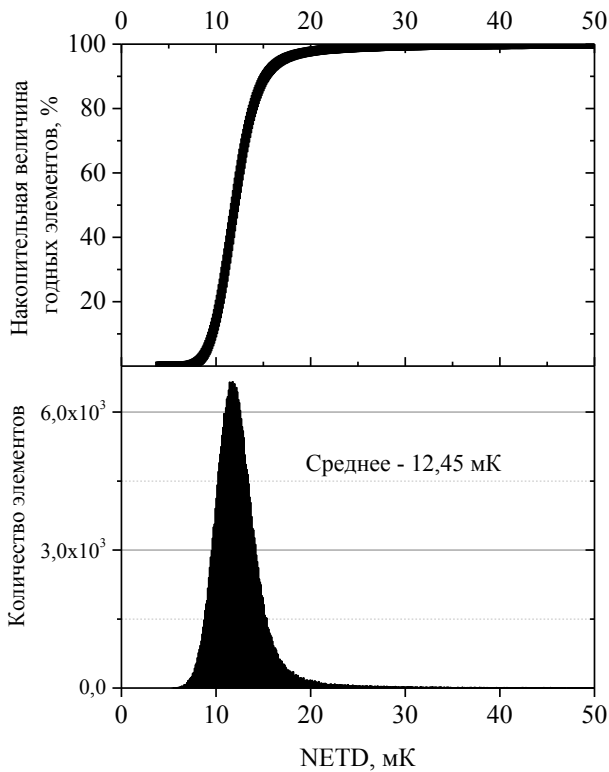
На рис. 6, а, б представлены соответственно гистограмма NETD и топограмма дефектных элементов матричного ФПУ. Дефектные элементы характеризуются избыточным $1/f$ -шумом, который, по-видимому, связан с шумом контактов и частично с V-дефектами в слоях КРТ. Наибольший дефектный кластер (один на всей матрице) состоит из 20 элемен-

тов, что является приемлемым для тепловизионных систем. Количество неприсоединенных элементов составляет 34 шт, что составляет примерно 0,01 %.

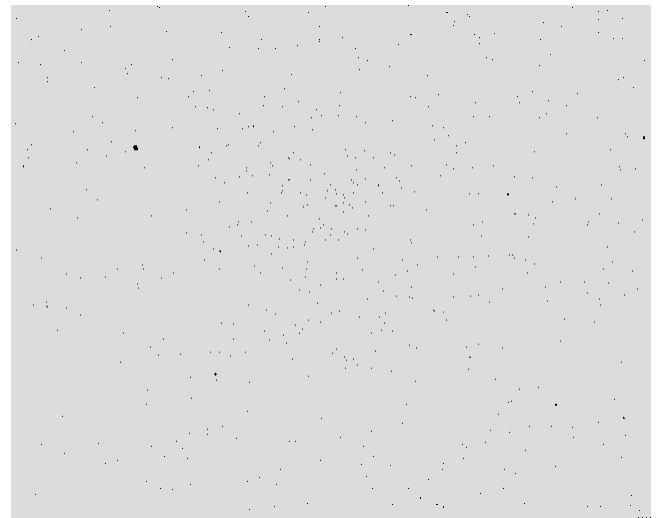


Рис. 5. Внешний вид матричного ФПУ формата 640×512 элементов.

В последнее время ведущие фирмы проводят исследования для повышения рабочей температуры ФПУ [11, 12]. Изменения в конструкции матричных фотоприемников направлены на снижение размера, веса и потребления энергии (SWaP). Эти исследования направлены для изготовления компактных фотоприемных устройств с оптимизированными характеристиками [13]. На рис. 7 представлена температурная зависимость NETD разработанного нами ФПУ. Видно, что величина NETD менее 15 мК при 78 К остается практически неизменной до рабочей температуры 130 К. С повышением рабочей температуры до 150 К величина NETD увеличивается но остается менее 20 мК. Количество работоспособных элементов медленно уменьшается с повышением рабочей температуры и при 140К все еще превышает 95 %.



а



б

Рис. 6. Характеристики ФПУ форматом 640×512 элементов: а) – гистограмма NETD; б) – топограмма дефектных элементов. Неприсоединенных элементов 0,01 %. Для критерия дефектности NETD < 50 мК количество дефектных элементов составляет 0,32 %.

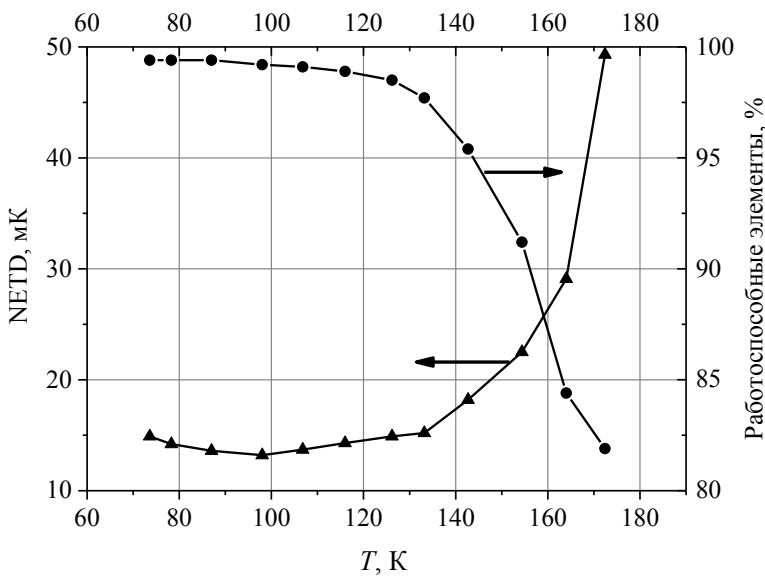


Рис. 7. Температурная зависимость среднего значения NETD матричного ФПУ размерностью 640×512 элементов. Критерий работоспособности элементов – NETD < 3 × <NETD>.

Заключение

Разработана конструкция и изготовлены матричные ФЧЭ форматом 640×512 элементов с шагом 25 мкм с длинноволновой границей чувствительности по уровню 0,5 около 5,2 мкм для средневолнового ИК-диапазона 3–5 мкм.

Разработана схема и топология, по которым изготовлены матричные мультиплексоры форматом 640×512 элементов с шагом 25 мкм, обеспечивающие рабочие режимы на тактовой частоте до 10 МГц.

Изготовлено матричное ФПУ форматом 640×512 элементов с шагом 25 мкм с парамет-

рами: средняя величина NETD < 13 мК, количество работоспособных элементов > 99,5 %. Фотоэлектрические параметры ФПУ сохраняются с повышением рабочей температуры вплоть до 130 К.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kinch M. A. // J. Electr. Mat. 2000. Vol. 29. No. 6. P. 809.
2. Kinch M. A. Fundamentals Physics of Infrared Detectors Materials. Vol. TT76. – Book, SPIE. 2007.
3. Leonardo DRS, <http://www.leonardocompany.com/>
4. Rogalski Antoni. // Progress in Quantum Electronics. 2012. Vol. 36. P. 342.
5. Pultz G. N., Norton P. R., Krueger E. E., Reine M. B. // J. Vac. Sci. Technol. 1991. Vol. B9. P. 1724.
6. Sidorov Yu. G., Dvoretzkiy S. A., Mikhailov N. N., Yakushev M. V., Varavin V. S., Antsiferov A. P. // Journal of Optical Technology. 2000. Vol. 67. P. 31.
7. Якушев М. В., Брунев Д. В., Варавин В. С., Васильев В. В., Дворецкий С. А., Марчишин И. В., Предеин А. В., Сабина И. В., Сидоров Ю. Г., Сорочкин А. В. // ФТП. 2011. Т. 45. № 3. С. 396.
8. 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. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 3. С. 224.
9. 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.
10. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. – Новосибирск: Наука, 2003.
11. Eich D., Schirmacher W., Hanna S., Mahlein K. M., Fries P., Figgemeier H. // Journal of Electronic Materials. 2017. Vol. 46. No. 9. P. 5448.
12. Kerlain A., Brunner A., Sam-Giao D., Pe're-Laperne N., Rubaldo L., Destefanis V., Rochette F., Cervera C. // Journal of Electronic Materials. 2016. Vol. 45. No. 9. P. 4557.
13. Manissadjian A., Rubaldo L., Rebeil Y., Kerlain A., Brellier D., Mollard L. Improved IR detectors to swap heavy systems for SWaP, Infrared Technology and Applications XXXVIII, edited by Bjørn F. Andresen, Gabor F. Fulop, Paul R. Norton, Proc. of SPIE, 8353, 835334 (2012) · © 2012 SPIE · CCC code: 0277-786X/12/\$18 · doi: 10.1117/12.921879

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

Matrix photodetector device format 640×512 elements on the basis of HgCdTe for the medium wave IR range

I. V. Marchishin, I. V. Sabinina, G. Yu. Sidorov, M. V. Yakushev, V. S. Varavin, V. G. Remesnik, A. V. Predein, S. A. Dvoretzkiy, V. V. Vasil'ev, Yu. G. Sidorov, D. V. Marin, A. P. Kovchavtsev, and A. V. Latyshev

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

Received February 4, 2019

The 640×512 FPAs with 25 μm pitch and 5 μm wavelength cut-off were designed and fabricated on the basis of HgCdTe/Si. The 640×512 with 25 μm pitch ROIC was designed and fabricated, providing the operating mode on the clock frequency up to 10 MHz. The cooled IDDCA 640×512 with 25 μm pitch was fabricated with the following parameters for best product: NETD mean value <13 mK, the operability >99.5 %.

Keywords: photodetectors, MCT, MBE, FPA, NETD, SWaP.

REFERENCES

1. M. A. Kinch, *J. Electr. Mat.* **29** (6), 809 (2000).
2. M. A. Kinch, *Fundamentals Physics of Infrared Detectors Materials. V. TT76* (Book, SPIE, 2007).
3. Leonardo DRS, <http://www.leonardocompany.com/>
4. Antoni Rogalski, *Progress in Quantum Electronics*, **36**, 342, (2012).
5. G. N. Pultz, P. R. Norton, E. E. Krueger, and M. B. Reine, *J. Vac. Sci. Technol.* **B9**, 1724 (1991).
6. Yu. G. Sidorov, S. A. Dvoretzkiy, N. N. Mikhailov, M. V. Yakushev, V. S. Varavin, and A. P. Antsiferov, *Journal of Optical Technology* **67**, 31 (2000).
7. M. V. Yakushev, D. V. Brunev, V. S. Varavin, V. V. Vasil'ev, S. A. Dvoretzkiy, I. V. Marchishin, A. V. Predein, I. V. Sabinina, Yu. G. Sidorov, and A. V. Sorochkin, *Semiconductors* **45** (3), 396 (2011).
8. A. V. Zverev, A. O. Suslyakov, I. V. Sabinina, G. Yu. Sidorov, M. V. Yakushev, V. D. Kuzmin, V. S. Varavin, V. G. Remesnik, Yu. S. Makarov, A. V. Predein, D. V. Gorshkov, S. A. Dvoretzkiy, V. V. Vasil'ev, Yu. G. Sidorov, A. V. Latsyshev, and I. I. Kre-mis, *Usp. Prikl. Fiz.* **6** (3), 224 (2018).
9. 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).
10. A. Rogalski, *Infrared Detectors*. (Nauka, Novosibirsk, 2003) [in Russian].
11. D. Eich, W. Schirmacher, S. Hanna, K. M. Mahlein, P. Fries, and H. Figgemeier, *Journal of Electronic Materials* **46** (9), 5448 (2017).
12. A. Kerlain, A. Brunner, D. Sam-Giao, N. Pe're-Laperne, L. Rubaldo, V. Destefanis, F. Rochette, and C. Cervera, *Journal of Electronic Materials* **45** (9), 4557 (2016).
13. A. Manissadjian, L. Rubaldo, Y. Rebeil, A. Kerlain, D. Brellier, and L. Mollard, *Improved IR detectors to swap heavy systems for SWaP*, in *Infrared Technology and Applications XXXVIII*, edited by Bjørn F. Andresen, Gabor F. Fulop, Paul R. Norton, Proc. of SPIE Vol. 8353, 835334 · © 2012 SPIE · CCC code: 0277-786X/12/\$18 · doi: 10.1117/12.921879