

УДК 621.383.4/5

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

Многорядные фотоприемные устройства на основе гетероэпитаксиальных структур HgCdTe коротковолнового ИК-диапазона спектра

Н. И. Яковлева, К. О. Болтарь, А. В. Никонов, А. В. Егоров

Исследованы параметры многорядных фотоприемных устройств (ФПУ) на основе гетероэпитаксиальных структур HgCdTe различного формата 288×4; 480×6; 576×4; 576×6 и др. с шагом от 28 до 14 мкм. Благодаря выбору N⁺/P-/р-архитектуры, ФПУ функционируют при повышенных температурах в режиме временной задержки и накопления, с реализацией аналогового режима ВЗН и замещением дефектных элементов непосредственно в БИС считывания. ФПУ обладают возможностью формирования изображения высокой четкости формата 768×576 пикселей при кадровой частоте 50 Гц в режиме реального времени. Для многорядных ФПУ получены высокие фотоэлектрические параметры: обнаружительная способность в максимуме спектральной чувствительности $D^ \geq 5 \times 10^{12}$ см Вт⁻¹ Гц^{1/2} при температурах $T \sim 170\text{--}200$ К, количество годных каналов не менее 99,0 %.*

Ключевые слова: HgCdTe, GaAs, коротковолновый инфракрасный спектральный диапазон, SWIR, гетероэпитаксиальные структуры, матрица фоточувствительных элементов, МФЧЭ, фотоприемное устройство, ФПУ, темновой ток

Введение

В настоящее время в опто- и фотоэлектронике развивается ряд новых направлений, связанных с разработкой фотоприемных устройств (ФПУ), работающих при повышенных температурах. Данные фотоприемные устройства построены на матрицах фоточувствительных элементов (МФЧЭ) со сверхнизкими значениями темнового тока, что не только существенно увеличивает чувствительность детектирующей оптико-электронной системы, но и позволяет реализовать усовершенствованные методы регистрации сверхслабых оптических сигналов и обработки изображений [1–3].

Целью данной работы являлся аналитический обзор параметров существующих многорядных фотоприемных устройств (МФПУ) на основе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) HgCdTe различного формата 288×4; 480×6; 576×4; 576×6 и др. с шагом от 28 до 14 мкм, способных работать при повышенных температурах, а также исследование возможностей совершенствования подобных МФПУ.

Постановка работы

В настоящее время изготовлены многорядные фотоприемные устройства коротковолнового ИК-диапазона различного формата (288×4; 480×6; 576×4; 576×6; и др. с шагом от 28 до 14 мкм), работающие в режиме временной задержки и накопления (ВЗН). Данные ФПУ обеспечивают построение 2D-изображений в реальном режиме времени с высоким пространственным разрешением с возможностью формирования изображения высокой четкости формата 768×576 пикселей с кадровой частотой 50 Гц, реализацией аналогового режима ВЗН и замещением дефектных элементов непосредственно в БИС считывания. У изготовленных ФПУ получены высокие фотоэлектрические параметры: обнаружительная способность в максимуме спектральной чувствительности $D^* \geq 5 \times 10^{12}$ см Вт⁻¹ Гц^{1/2} при температуре $T \approx 170\text{--}200$ К, при этом количество годных каналов более 99,0 %.

Яковлева Наталья Ивановна¹, главный научный сотрудник.
Болтарь Константин Олегович^{1,2}, начальник НТК,
профессор, д.ф.-м.н.

Никонов Антон Викторович^{1,2}, начальник НИЦ,
доцент, к. ф.-м.н.

Егоров Александр Васильевич¹, ученый секретарь, доцент,
к.т.н.

¹ АО «НПО «Орион»».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

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

² Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,
Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 30 мая 2017 г.

© Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Никонов А. В., Егоров А. В., 2017

Многорядные фотоприемные устройства, работающие в режиме ВЗН, имеют следующие преимущества:

- увеличение равномерности чувствительности, замена дефектных элементов;
- повышение фотоэлектрических характеристик по сравнению с матричными ФПУ за счет использования режима временной задержки и накопления (ВЗН), применяемого в сканирующих ФПУ (увеличение отношения сигнал-шум в $N^{1/2}$ раз независимо от вида шумового спектра, в том числе в условиях ограничения фоном);
- повышение пространственного разрешения за счет применения безззорной топологии ФЧЭ;
- реализация в ряде фотоприемных устройств полноформатного режима изображения 768x576 пикселей и выше.

Тройное соединение HgCdTe крайне перспективно для ФПУ данного типа, поскольку благодаря фундаментальным свойствам материала $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (кристаллической структуре, прямозонной зонной диаграмме, незначительному изменению в зависимости от состава постоянной кристаллической решетки; большому коэффициенту оптического поглощения) обеспечиваются высокие квантовая эффективность и чувствительность при производстве многорядных фотоприемных устройств коротковолнового ИК-диапазона спектра [4]. Заметим, что отечественные разработки в настоящее время находятся на уровне лучших зарубежных аналогов фирм Sofradir (Франция) [5, 6] и Aim Infrarot Module (Германия) [7].

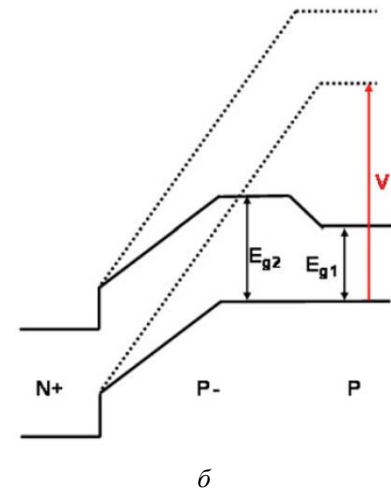
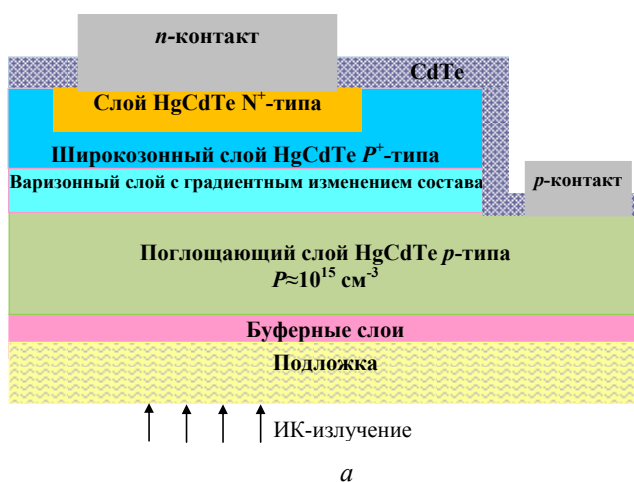


Рис. 1. Матрица фоточувствительных элементов на основе гетероструктуры $N^+/P^-/p$ -типа из HgCdTe: а) архитектура МФЧЭ; б) схематичное представление соответствующей зонной диаграммы.

Данная архитектура содержит следующие компоненты: поглощающий слой p -типа проводимости для эффективного сбора фотогенерирован-

Функционирование при повышенных температурах осуществляется благодаря конструкции матрицы фоточувствительных элементов на основе ГЭС HgCdTe, обеспечивающей низкие темновые токи, а также многофункциональной оригинальной БИС считывания и обработки сигналов [8].

Архитектура матрицы фоточувствительных элементов

Для построения МФЧЭ на основе HgCdTe наиболее часто используются две простые двухслойные архитектуры: планарная N^+ -on- p архитектура и мезаструктурная (или планарная) P -on- n архитектура. Планарная N^+ -on- p архитектура наиболее широко применяется отечественными производителями [9], поэтому оценка ее параметров и возможности работы при повышенных температурах крайне важна.

Для включения в состав многорядных ФПУ разработаны и изготовлены по планарной технологии матрицы фоточувствительных элементов на основе гетероструктуры $N^+/P^-/p$ -типа с поглощающим слоем $Hg_{0,58}Cd_{0,42}Te$ p -типа проводимости толщиной 5,0–8,0 мкм, с уровнем легирования $N_A \leq 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и широкозонным диэлектрическим слоем CdTe толщиной 1 мкм, пассивирующим поглощающим слоем $Hg_{0,59}Cd_{0,41}Te$ и уменьшающим токи поверхностной рекомбинации. Архитектура МФЧЭ на основе гетероструктуры $N^+/P^-/p$ -типа и её зонная диаграмма схематично представлены на рис. 1, а, б.

ных носителей заряда; широкозонный P -слой для уменьшения темновых токов; сильно легированную область N^+ -типа, которая не вносит существ-

венного вклада в процессы токообразования из-за подавления термического и оптического механизмов генерации. Такая архитектура матрицы фоточувствительных элементов на основе гетероструктуры N^+/P \bar{p} -типа с облучением со стороны оптически прозрачной подложки обеспечивает эффективное поглощение в слое $Cd_{0,42}Hg_{0,58}Te$ для достижения максимальной квантовой эффективности при заданном времени накопления фотосигнала и минимальные темновые токи для обеспечения высоких фотоэлектрических параметров.

ИК-излучение (рис. 1, а) попадает в область поглощения, затем проходит через нелегированный варизонный слой с градиентно-изменяющейся шириной запрещенной зоны и попадает в область пространственного заряда, за которым следует широкозонный N^+ -слой. При малых напряжениях обратного смещения в данной структуре имеется небольшой барьер для неосновных носителей заряда (см. рис. 1, б), который можно устранить при подаче больших напряжений на фотодиод.

Градиент состава при переходе в широкозонную область выбирается таким образом, чтобы темновой ток в области обеднения был меньше, чем в области поглощения. Таким образом, темновой ток при рабочих температурах может быть уменьшен для любой граничной длины волны. Представленная архитектура позволяет также устранить проблемы с туннельными токами, которые существенно влияют на работу фотодиодов на основе $HgCdTe$.

Гетероструктуры на основе архитектуры N^+/P \bar{p} -типа с двухкомпонентным слоем $HgCdTe$ p -типа с градиентным изменением ширины запрещенной зоны выращивалась в ИХВВ РАН (Нижний Новгород) [10] методом могибридной эпитаксии на согласованной с поглощающим слоем $Cd_{0,42}Hg_{0,58}Te$ по кристаллической структуре подложке $GaAs$ n^+ -типа проводимости. Пассивация поверхности структуры осуществлялась диэлектрическим покрытием $CdTe$. Для формирования матрицы фотодиодов различного формата проводилась операция двойного ионного легирования ионами Ag^+ , позволяющая сформировать фотодиоды со стабильными характеристиками. Затем формировались контактные слои к фотодиодам и базовому слою.

Исследования параметров ФПУ на основе гетероструктур $HgCdTe$

Проведены исследования температурных зависимостей темновых токов J_d фотодиодов на основе ГЭС $HgCdTe$ с архитектурой N^+/P \bar{p} -типа. На рис. 2 представлена температурная зависимость темнового тока одного из фотодиодов мат-

рицы ФЧЭ с поглощающим слоем p -типа проводимости для состава $x = 0,42$ мол. дол.

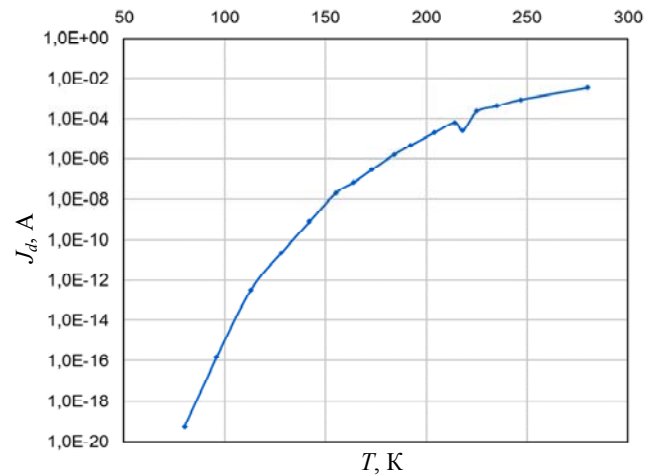


Рис. 2. Температурная зависимость темнового тока J_d одного из фотодиодов матрицы ФЧЭ, изготовленной на основе ГЭС $HgCdTe$ с поглощающим слоем p -типа проводимости для состава $x = 0,42$ мол. дол.

Моделирование темновых токов для МФЧЭ с архитектурой N^+/P \bar{p} -типа проведено с учетом механизмов генерации-рекомбинации Оже, Шокли-Рида-Холла (ШРХ), а также с учетом токовых механизмов вследствие наличия металлических вакансий ртути в поглощающем слое [11]. На рис. 3 представлена температурная модель суммарного темнового тока J_d в виде соотношения $J_{Sum} = J_{Aug} + J_{SRH} + J_{Vac}$, включающего соответственно вышеперечисленные составляющие.

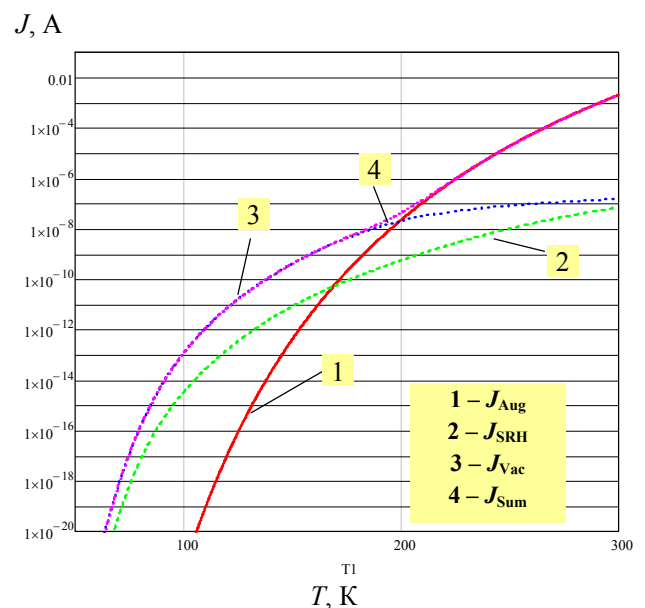


Рис. 3. Температурная модель темнового тока J_{Sum}

Как правило, архитектуры на основе $HgCdTe$ подразделяется на два варианта:

– структуры с вакансионно-легирующим поглощающим слоем HgCdTe, для которых темновой ток включает составляющую, обусловленную наличием металлических вакансий;

– структуры с поглощающим слоем, легированным внешними примесями, например, индием In, в которых вакансионная составляющая темнового тока отсутствует.

Поэтому в зависимости от выбора типа легирования структур HgCdTe темновые токи в них существенно различаются. Из рис. 3 видно, что вакансионная токовая составляющая дает существенный вклад в суммарный темновой ток в обла-

сти низких температур ($T \leq 100$ К). В области высоких температур темновой ток в основном определяется диффузионными процессами вследствие генерации-рекомбинации по механизму Оже.

Проведены измерения темновых токов и обнаружительной способности в многоядных ФПУ различных форматов (288×4 , 576×6 и 576×4 элементов) с граничными длинами волн от 2,5 до 8,0 мкм, созданных на основе HgCdTe с вакансионно-легирующим поглощающим слоем. На рис. 4, а, б представлены значения обнаружительной способности D^* в зависимости от граничной длины волны (точки - эксперимент, сплошные линии - теоретическая оценка).

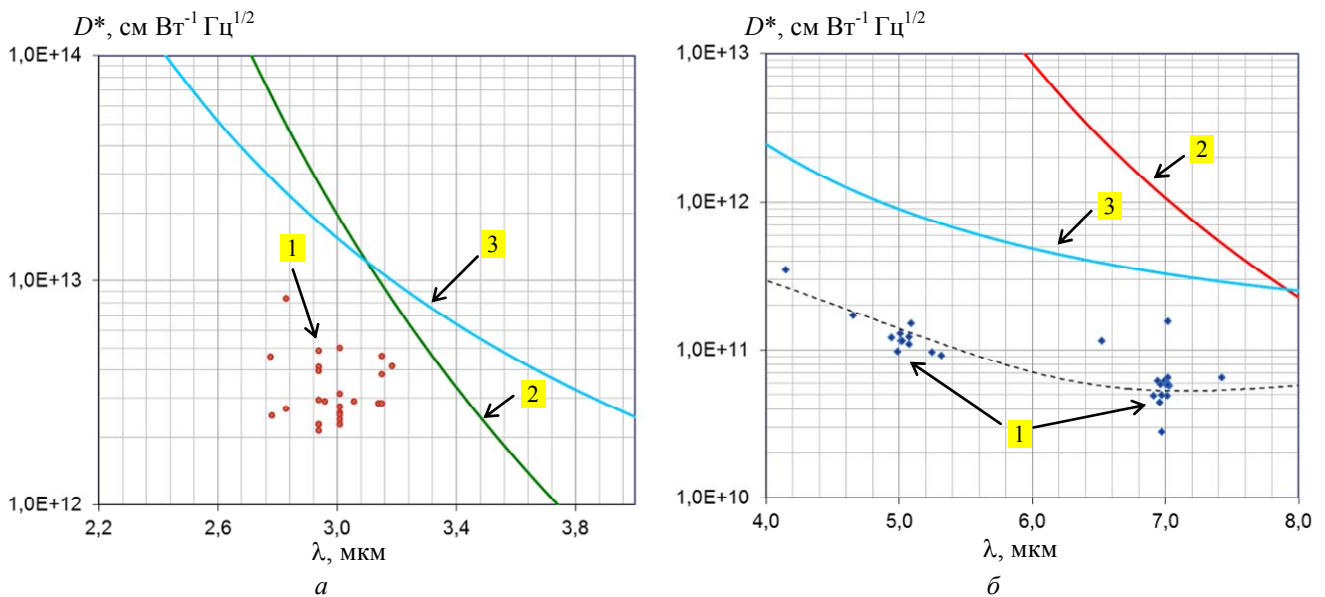


Рис. 4. Значения обнаружительной способности D^* фотодиодов на основе ГЭС HgCdTe в зависимости от граничных длин волн в диапазоне $\lambda = 2-8$ мкм: а) ФПУ коротковолнового ИК-диапазона спектра: (1) – данные экспериментов; (2) – диффузионный предел ($T = 170$ К); (3) – режим ограничения фоном; б) ФПУ с граничными длинами волн в диапазоне 4–8 мкм: (1) – данные экспериментов; (2) – диффузионный предел ($T = 80$ К); (3) – режим ограничения фоном.

Из рис. 4, а видно, что для ФПУ коротковолнового ИК-диапазона с поглощающим слоем состава $x = 0,39-0,42$ мол. дол. экспериментальные данные для обнаружительной способности (точки 1) близки к значению $D^* = 5 \times 10^{12}$ см Вт⁻¹ Гц^{1/2}. При этом полученные значения примерно в два раза меньше, чем теоретически достижимый диффузионный предел, определяемый Оже-процессами ($D^* \approx 1 \times 10^{13}$ см Вт⁻¹ Гц^{1/2} при $T = 170$ К). В случае ФПУ с граничными длинами волн в диапазоне 4–8 мкм (рис. 4, б) значения обнаружительной способности D^* фотодиодов не достигают режима ограничения фоном примерно на порядок. Ограничение обнаружительной способности D^* в обоих случаях можно объяснить наличием дополни-

тельного темнового тока за счет металлических вакансий ртути в материале HgCdTe. Отметим, что для представленной архитектуры $N^+/P^-/p$ -типа диффузионный предел достижим при легировании поглощающего слоя внешними примесями при полном отсутствии вакансий.

Ниже в таблице представлены характеристики многоядных ФПУ формата 576×6 элементов с реализацией режима ВЗН в фокальной плоскости и замещением дефектных элементов при рабочей температуре $T = 170$ К. Среднее значение удельной обнаружительной способности ФПУ в максимуме спектральной характеристики составило $6,2 \times 10^{12}$ см Вт⁻¹ Гц^{1/2}, количество дефектных каналов составило менее 0,35 %.

Таблица

Характеристики многорядных ФПУ формата 576×6 элементов с реализацией режима ВЗН в фокальной плоскости и замещением дефектных элементов при рабочей температуре $T = 170$ К.

Наименование параметра, единица измерения (режим измерения)	Обозначение параметра	Требование	Полученное значение
Формат, элементов	$a \times b$	6×576	6×576
Шаг элементов, мкм	h	28	28
Уменьшенный шаг, мкм		14	14
Коротковолновая граница области спектральной чувствительности по уровню 0,1, не более, мкм	λ_k	1,85	1,85
Длинноволновая граница области спектральной чувствительности по уровню 0,1, не менее, мкм	λ_d	3,0	2,93
Среднее значение удельной обнаружительной способности ФПУ в максимуме спектральной характеристики, не менее, см Гц ^{1/2} Вт ⁻¹	$D^*_{\lambda_{max}}$	5×10^{12}	$6,2 \times 10^{12}$
Среднее значение вольтовой чувствительности в максимуме спектральной характеристики, не менее, В/Вт	S_u	1×10^{10}	$1,4 \times 10^{11}$
Среднеквадратичная неравномерность вольтовой чувствительности, не более, %	σS_u	10	5
Количество дефектных каналов, не более, %	$N_{ДФ}$	1,0	0,35
Максимальная частота вывода данных по одному выходу, не менее, МГц	$F_{ВЫХ}$	8	8

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность использования архитектуры $N^+/P^-/p$ -типа при условии высокого структурного совершенства материала HgCdTe в области поглощения с уровнем легирования $N_A \leq 10^{15}$ см⁻³ при повышенных температурах ($T = 170$ – 200 К). Использование гетеропереходов в двойных структурах P - on - n -типа при отсутствии вакансионного тока позволяет, как минимум, в два раза уменьшить темновые токи и, соответственно, увеличить R_0A и D^* , приблизившись к теоретическому диффузионному пределу.

Заключение

В работе проведены исследования параметров многорядных фотоприемных устройств различного формата от 2×96; 4×288; 4×576; 6×576 элементов и др. коротковолнового ИК-диапазона спектра на основе гетероструктур HgCdTe в температурном диапазоне $T = 170$ – 200 К.

Для включения в состав многорядных ФПУ разработаны и изготовлены по планарной технологии матрицы фоточувствительных элементов на основе гетероструктуры $N^+/P^-/p$ -типа с поглощающим слоем Hg_{0,58}Cd_{0,42}Te p -типа проводимости толщиной 5,0–8,0 мкм, причем с уровнем легирования $N_A \leq 5 \times 10^{15}$ см⁻³ и широкозонным диэлектрическим слоем CdTe толщиной 1 мкм, пассивирующим поглощающим слоем Hg_{0,59}Cd_{0,41}Te и одновременно уменьшающим токи поверхностной рекомбинации.

Одной из особенностей архитектуры МФЧЭ является то, что p - n -переход формируется в более

широкозонной области структуры, состав которой выбирается большим ($x > 0,45$ мол. дол.), чем состав в поглощающей области Cd_{0,42}Hg_{0,58}Te ($x \approx 0,42$ мол. дол.). Основная часть излучения поглощается в слаболегированной области поглощения p -типа проводимости, концентрация легирующей примеси в которой выбрана таким образом, чтобы максимально подавить механизмы Оже-7 и Шокли-Рида-Холла. В результате темновые токи существенно уменьшаются ($I_d \approx 10^{-8}$ – 10^{-12} А), что позволяет ФПУ работать при повышенных температурах $T = 170$ – 200 К, обеспечивая при этом высокую обнаружительную способность $D^* \geq 5 \times 10^{12}$ см Вт⁻¹ Гц^{1/2} в максимуме спектральной чувствительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М., Дегтярев Е. В. // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 43.
2. Boltar K. O., Burlakov I. D., Filachev A. M., Klimanov E. A., Ponomarenko V. P., Solyakov V. N., Stafeev V. I. // Information Optics. 2007. Vol. 16. No. 4. P. 234.
3. Boltar K. O., Burlakov I. D., Ponomarenko V. P., Yakovleva N. I., Klimanov E. A., Akimov V. M. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2008. Vol. 17. No. 1. P. 9.
4. Rogalski A. // Rep. Prog. Phys. 2005. Vol. 68. P. 2267.
5. Gravrand O., Mollard L., Boulade O., Moreau V., Sanson E., Destefanis G. // Journal of Electronic Materials. 2012. Vol. 41. No. 10.
6. Vuillermet M., Billon-Lanfrey D., Reibel Y., et al. // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8353. P. 83532K.
7. Figgemeier H., Benecke M., Hofmann K., Oelmaier R., Sieck A., Wendler J., Ziegler J. // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9070. P. 907008.

8. Кузнецов П. А., Моцев И. С. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 163.

9. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Филачев А. М., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 61.

10. Чилиясов А. В., Моисеев А. Н., Степанов Б. С., Савлинов К. Е., Котков А. П., Гришинова Н. Д. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 213.

11. Kinch Michael A. // Journal of Electronic Materials. 2010. Vol. 39. No. 7. P. 1043.

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

HgCdTe 2-D scanning hybrid FPAs

N. I. Yakovleva¹, K. O. Boltar^{1,2}, A. V. Nikonov^{1,2}, and A. V. Egorov¹

¹ Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

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

Received May 30, 2016

The HgCdTe 2-D scanning hybrid FPAs have been developed and investigated. The major global suppliers of these IR FPAs (288×4; 480×6; 576×4; 576×6 and so on with a pitch from 28 μm down to 14 μm) reveal the availability of a wide variety of the shortwave spectral band (SWIR) FPAs. Photodiodes with their very low dark currents due to an N⁺/P⁻/p architecture operate at high temperature condition in the TDI-mode with replacement of defect pixels in the read-out integrated circuits (ROIC) assembled in 2-D arrays. A photodetector has the ability of forming an image of the high-definition format as high as 768×576 pixels and the frame rate of 50 Hz in real-time. The HgCdTe 2-D scanning hybrid FPAs show the possibility to achieve detectivity D* more than ~ 5×10¹² cm W⁻¹ Hz^{1/2} at temperatures T ~ 170-200 K and the operability of more than 99.0 %.

Keywords: HgCdTe, Short Wavelength Infrared Region, SWIR, heterostructures, Focal Plane Array, FPA, photodetector, dark current, high operating temperature.

REFERENCES

1. I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev, and E. V. Degtyarev, Prikl. Fiz., No. 2, 43 (2007).

2. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, E. A. Klimanov, V. P. Ponomarenko, V. N. Solyakov, and V. I. Stafeyev, Optical Memory and Neural Networks (Information Optics) **16**, 234 (2007).

3. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, N. I. Yakovleva, E. A. Klimanov, and V. M. Akimov, Optical Memory and Neural Networks (Information Optics) **17**, 9 (2008).

4. A. Rogalski, Rep. Prog. Phys. **68**, 2267 (2005).

5. O. Gravrand, L. Mollard, O. Boulade, V. Moreau, E. Sanson, and G. Destefanis, Journal of Electronic Materials **41** (10), (2012).

6. M. Vuillermet, D. Billon-Lanfrey, Y. Reibel, A. Manisadjian, L. Mollard, N. Baier, O. Gravrand and G. Destefanis, Proc. SPIE **8353**, 83532K (2012).

7. H. Figgemeier, M. Benecke, K. Hofmann, R. Oelmaier, A. Sieck, J. Wendler, and J. Ziegler, Proc. SPIE **9070**, 907008 (2014).

8. P. A. Kuznetsov and I. S. Moshchev, Usp. Prikl. Fiz. **2**, 163 (2014).

9. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, and N. I. Yakovleva, Prikl. Fiz., No. 3, 61 (2012).

10. A. V. Chilyasov, A. N. Moiseev, B. S. Stepanov, K. E. Savlinov, A. P. Kotkov, and N. D. Grishnova, Usp. Prikl. Fiz. **1**, 213 (2013).

11. Michael A. Kinch, Journal of Electronic Materials **39**, 1043 (2010).