

УДК 621.383

PACS: 72.20Jv, 81.05.Dz, 85.60.Gz, 85.60.Gv

Мегапиксельное матричное фотоприёмное устройство среднего ИК-диапазона

В. М. Базовкин, В. С. Варавин, В. В. Васильев, А. В. Глухов, Д. В. Горшков, С. А. Дворецкий,
А. П. Ковчавцев, Ю. С. Макаров, Д. В. Марин, И. В. Мжельский, В. Г. Половинкин,
В. Г. Ремесник, И. В. Сабина, Ю. Г. Сидоров, Г. Ю. Сидоров, А. С. Строганов,
А. В. Царенко, М. В. Якушев, А. В. Латышев

Рассмотрены параметры средневолнового инфракрасного фотоприёмного устройства, изготовленного в виде гибридной микросхемы на основе фокальной матрицы планарных p^+r -переходов HgCdTe с числом 2048×2048 элементов и кремниевого мультиплексора. Температурная зависимость обратного тока элементов в диапазоне 125–300 К имела характерную зависимость Аррениуса с энергией активации близкой к ширине запрещенной зоны полупроводника и лимитировалась диффузионной компонентой тока. При более низкой температуре ток лимитировался генерацией носителей с участием глубокого уровня локализованного вблизи середины запрещенной зоны. Гистограмма обнаружительной способности элементов матрицы имела вид симметричной кривой с максимумом и средним значением $\approx 1,3 \times 10^{12}$ см Гц^{1/2}/Вт.

Ключевые слова: ФПУ, HgCdTe, ИК-матрица, гетероструктура, мультиплексор, обнаружительная способность.

Ссылка: Базовкин В. М., Варавин В. С., Васильев В. В., Глухов А. В., Горшков Д. В., Дворецкий С. А., Ковчавцев А. П., Макаров Ю. С., Марин Д. В., Мжельский И. В., Половинкин В. Г., Ремесник В. Г., Сабина И. В., Сидоров Ю. Г., Сидоров Г. Ю., Строганов А. С., Царенко А. В., Якушев М. В., Латышев А. В. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 6. С. 501.

Reference: V. M. Bazovkin, V. S. Varavin, V. V. Vasil'ev, et al., Usp. Prikl. Fiz. 6 (6), 501 (2018).

Введение

Охлаждаемые мегапиксельные фокальные матрицы ИК-диапазона находят применение в астрономии при исследовании дальнего космоса, мониторинга окружающей среды и ряда специальных применений при формировании панорамных изображений [1–5].

Гибридные микросхемы фотоприёмных устройств (ФПУ) среднего ИК-диапазона (3–5 мкм) с числом элементов $\sim 10^6$ и выше на основе матрицы фоточувствительных гетероструктур с p - n - и p - r -переходами достигли высокого качества и уже выпускаются рядом зарубежных фирм. Список основных производителей и ключевые характеристики их изделий приведены ниже.

Базовкин Владимир Михайлович¹, н.с.
Варавин Василий Семенович¹, с.н.с, к.ф.-м.н.
Васильев Владимир Васильевич¹, рук. группы, с.н.с., к.ф.-м.н.
Глухов Александр Викторович², зам. ген. директора по научной работе, к.т.н.
Горшков Дмитрий Витальевич¹, вед. инженер.
Дворецкий Сергей Алексеевич¹, зав. отделом, в.н.с., к.ф.-м.н.
Ковчавцев Анатолий Петрович¹, и.о. зав. лаб., в.н.с, д.ф.-м.н.
Макаров Юрий Сергеевич¹, инженер.
Марин Денис Викторович¹, н.с.
Мжельский Иван викторович¹, ст. инженер.
Половинкин Владимир Григорьевич, с.н.с., к.ф.-м.н.
Ремесник Владимир Григорьевич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.
Сабина Ирина Викторовна¹, с.н.с., к.ф.-м.н.
Сидоров Юрий Георгиевич¹, г.н.с., д.ф.-м.н.
Сидоров Георгий Юрьевич¹, зав. лаб., к.ф.-м.н.
Строганов Александр Сергеевич¹, вед. инженер.
Царенко Алексей Викторович¹, вед. инженер.

Якушев Максим Витальевич¹, зав. лаб., д.ф.-м.н.
Латышев Александр Васильевич¹, директор ИФП СО РАН, д.-ф.-м.н., академик РАН.
¹ ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова.
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.
E-mail: kap@isp.nsc.ru
² АО НПП «Восток».
Россия, 630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 228.
E-mail: gluhov@nzzpp.ru

Статья поступила в редакцию 25 октября 2018 г.

© Базовкин В. М., Варавин В. С., Васильев В. В., Глухов А. В., Горшков Д. В., Дворецкий С. А., Ковчавцев А. П., Макаров Ю. С., Марин Д. В., Мжельский И. В., Половинкин В. Г., Ремесник В. Г., Сабина И. В., Сидоров Ю. Г., Сидоров Г. Ю., Строганов А. С., Царенко А. В., Якушев М. В., Латышев А. В., 2018

Teledyne Imaging Sensors (USA) – ФПУ H2RG на основе HgCdTe форматом 2048×2048 элементов, шагом элементов 18 мкм, длинноволновым краем поглощения 5,3 мкм, рабочей температурой 37 К. ФПУ на основе HgCdTe форматом 1024×1024 элементов с длиной волны отсечки 4,2, 4,8 и 5,2 мкм. Камера Cruz MWIR 1280-12, с матрицей форматом 1280×1024 элементов на InSb, шагом элементов 12 мкм спектрального диапазона 1–6 мкм имеет долю рабочих элементов 99,5 %.

Raytheon Vision Systems (USA) выпускал ФПУ форматом 1024×1024 элементов на InSb с шагом 30 мкм спектрального диапазона 0,6–5 мкм, рабочей температурой 50 К. Также ФПУ форматом 2048×2048 HgCdTe, шагом элементов 25 мкм и рабочей температурой 32 К и ФПУ форматом 2048×2048 HgCdTe/Si с шагом элементов 15 мкм спектрального диапазона 3–5 мкм и рабочей температурой 78 К.

Sofradir (Франция) – ФПУ Jupiter MW на основе HgCdTe форматом 1280×1024 элементов HgCdTe с шагом 15 мкм спектрального диапазона 3,7–4,8 мкм и рабочей температурой 77–90 К, NETD 19 мК, числом сигнальных выходов 4 или 8, доля рабочих элементов 99,8 %. ФПУ DAPHNIS-HD MW на основе HgCdTe форматом 1280×720 и шагом элементов 10 мкм спектрального диапазона 3,7–4,8 мкм [6]. ФПУ HD720 16:9 (1280×720) и ФПУ XGA 5:4 (1024×768) спектрального диапазона ~5 мкм с шагом элементов 10 мкм, рабочей температурой ~110 К, NETD < 25 мК, частотой кадров до 100 Гц [7].

SCD (Израиль) – ФПУ на основе InSb форматом 1280×1024 элементов, шагом 15 мкм, спектрального диапазона 3–5 мкм, рабочей температурой 77 К, NETD ~20 мК [8].

AIM (Германия) – в работах [9–11] описан модуль ФПУ на основе матрицы 1280×1024 n - p -переходов на основе HgCdTe с шагом 15 мкм среднего спектрального диапазона с долей дефектных пикселей ~0,4–0,5 % при рабочей температуре 95–110 К и NETD ~18–20 мК. В работе [12] представлен модуль ФПУ с матрицей формата 1024×768, шагом элементов 10 мкм, рабочей температурой 80 К, долей рабочих элементов 99,95 %, величиной NETD ~20 мК.

DRS (USA) – ФПУ на основе сплава $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ форматом 1280×1024 элементов, шагом 18 мкм, средневолнового диапазона ($\lambda_0 \approx 4,9$ мкм), $D^* \approx 10^{11}$ (см Гц^{1/2})/Вт при $T = 150$ К [13].

Selex – ФПУ SuperHaw форматом 1280×1024 на основе HgCdTe с шагом 8 мкм спектрального диапазона 3,7–4,95 мкм и рабочей температурой 110 К, NETD 20 мК, с долей рабочих элементов ~99,8 % [14].

LEONARDO (Италия) – выпускает модуль ФПУ FALCON 720 на основе HgCdTe фокальной матрицы 1280×720 элементов с шагом 12 мкм спектрального диапазона 3–5 мкм, с долей дефектных элементов 0,2 %, NETD 19 мК и рабочей температурой 80–100 К.

По мере развития технологических процессов увеличивался размер полупроводниковых пластин, улучшалась однородность параметров материала и уменьшалась дефектность слоев HgCdTe, что привело к созданию матриц большого формата [15].

В настоящей работе представлены параметры отечественного фотоприемного устройства среднего ИК-диапазона, выполненного в виде гибридной микросхемы, состоящей из полупроводниковой HgCdTe матрицы на кремниевой подложке и микросхемы кремниевого мультиплексора.

Модуль фотоприемного устройства

Матричное фотоприемное устройство представляет собой гибридную микросхему, состоящую из матрицы планарных фоточувствительных n^+p -переходов размерностью 2048×2048 элементов и кремниевой микросхемы мультиплексор, соединенных между собой индиевыми столбиками методом Flip Chip. Каждый элемент матрицы соединен с индивидуальной входной ячейкой мультиплексора. Вывод сигналов осуществляется через 8 выходов мультиплексора. Частота вывода сигнальной информации с выходов мультиплексора – не менее 8 МГц, диапазон изменения времени накопления сигнала 0,2–50 мс, зарядовая емкость входной ячейки $\sim 1,9 \times 10^6$ электронов, напряжение питания 3,3 В. Мультиплексор имеет встроенный датчик температуры с точностью измерения $\pm 0,1$ К на основе p^+n -перехода, включенного в прямом направлении. Падение напряжения на диоде линейно уменьшалось с температурой в диапазоне 60–300 К.

ИК-матрица изготавливалась на гетероэпитаксиальной структуре $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Si}(310)$, которая выращивалась в многокамерной сверхвысоковакуумной установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Обь». Для *in situ* контроля процессов предэпитаксиальной подготовки и роста использовались дифракция быстрых электронов и одноволновая эллипсометрия на длине волны $\lambda = 632,8$ нм. На рис. 1 показано типичное распределение состава гетероэпитаксиальной структуры по толщине пленки. Пленки были монокристаллические с плотностью V-дефектов ~ 500 см⁻².

На кремниевой подложке диаметром 76,2 мм выращивались буферные слои ZnTe и CdTe, затем рабочий слой n -типа проводимости толщиной от

6,5 до 8,5 мкм и варизонный слой толщиной ~0,4 мкм для защиты поверхности рабочего слоя. Параметры рабочего слоя измерялись при температуре 78 К. Концентрация доноров для разных образцов варьировалась в диапазоне $(3,3-8) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, подвижность электронов в диапазоне $(8-17) \times 10^3 \text{ (см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}\text{)}$, время жизни неосновных носителей в диапазоне (1-4) мкс. Последующий отжиг структур в парах ртути приводил к конверсии рабочего слоя в материал *p*-типа проводимости с концентрацией $(6-11) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, подвижностью дырок 307-370 $(\text{см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}\text{)}$, временем жизни неосновных носителей 22-57 нс.

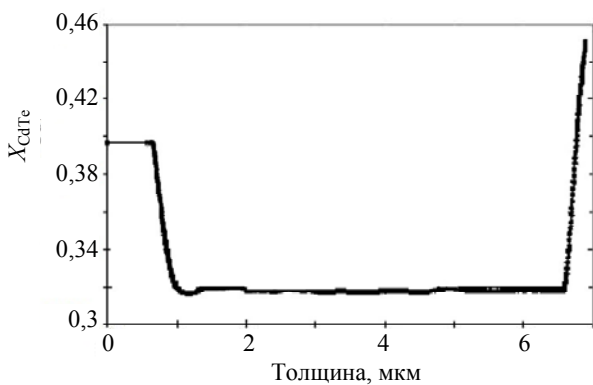


Рис. 1. Распределение состава гетерозитаксиальной структуры по толщине. Отсчет координаты от кремниевой подложки. Справа показан варизонный слой HgCdTe.

На полупроводниковых пластинах методами планарной технологии были изготовлены фотоприемные матрицы. Шаг элементов в матрице составлял величину 22 мкм.

Схематичная структура фотоприёмного элемента в разрезе показана на рис. 2.

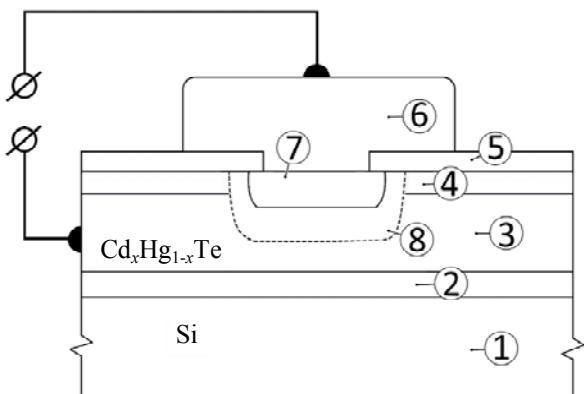


Рис. 2. Структура фотоприёмного элемента в разрезе: 1 – кремниевая несущая подложка, 2, 4 – градиентные переходные варизонные слои, 3 – фоточувствительный рабочий слой *p*-типа проводимости, 5 – защитный диэлектрик толщиной ~0,1 мкм, 6 – индиевый столбик, 7 – область имплантированного бора (n^+ -слой), 8 – область пространственного заряда n - p -перехода.

Через индиевые столбики элементы матрицы подключались к индивидуальным накопительным емкостям кремниевого мультиплексора.

При измерениях элементы матрицы облучались через кремниевую подложку от имитатора абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой полости 573 К.

При приложении обратного смещения к элементам матрицы через n^+ - p -переход протекал ток, который заряжал накопительную емкость. Электроны, генерированные ИК-излучением, из квазинейтральной области активного слоя 3 за счет диффузии и из области пространственного заряда n^+ - p -перехода 8 за счет диффузии и дрейфа в электрическом поле n^+ - p -перехода достигали контакта 6.

Фотоэлектрические параметры ФПУ

Вольт-амперные характеристики элементов матриц, измеренные электрометром KEITHLEY 6517В, имели типичный диодный вид в отсутствие освещения. Температурная зависимость плотности обратного тока n^+ - p -перехода элемента матрицы с $X_{\text{CdTe}} \approx 0,32$ при двух величинах приложенного смещения в отсутствие освещения показана на рис. 3.

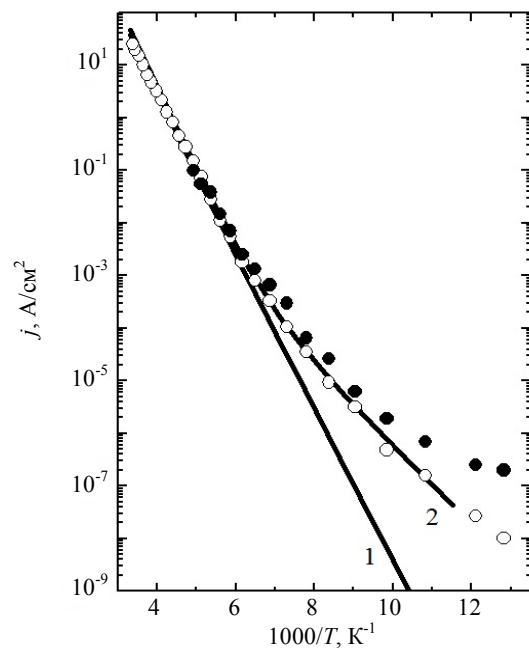


Рис. 3. Температурные зависимости плотности обратного тока j n^+ - p -фотодиода матрицы. Кривая 1 – теоретическая зависимость при учете диффузионного тока. Кривая 2 – теоретическая зависимость при учете диффузионного тока и генерационно-рекомбинационного тока при концентрации генерационного центра 10^{15} см^{-3} . Светлые кружки – экспериментальная плотность тока при обратном смещении ~0,2 В. Темные кружки – экспериментальная плотность тока при обратном смещении ~1,4 В.

При обратном смещении диода величина тока элемента матрицы описывалась теоретической зависимостью, которая учитывала диффузию, дрейф и рекомбинацию неосновных носителей тока с участием глубокого уровня рабочего слоя, локализованного по энергии вблизи середины запрещенной зоны. Расчет теоретической зависимости проводился в рамках одномерной диффузионно-дрейфовой модели [16]. Достаточно хорошее совпадение теории и эксперимента наблюдалось при обратных смещениях от $-0,1$ до $-0,5$ В при концентрации глубоких уровней $\sim 1,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и сечении захвата $\sim 10^{-15} \text{ см}^2$. В области обратных смещений от $-0,5$ до $-1,5$ В наблюдалось увеличение тока, связанное с дополнительными механизмами проводимости, которые зависели от напряженности электрического поля в n^+p -переходе диода. Активационная зависимость плотности тока сначала ослаблялась, а затем практически исчезала. Характер температурных зависимостей обратного тока n^+p -переходов соответствовал данным, полученным в работах [17–27], в которых анализировались диоды на основе слоев HgCdTe, полученных методом жидкофазной эпитаксии.

Топограмма напряжений элементов модуля ФПУ при облучении от АЧТ (573 К) представляла собой достаточно ровное поле сигналов со случайным распределением дефектных элементов с относительной долей от 0,5 % до 1,5 % для разных микросхем. К дефектным элементам относили элементы с малой величиной полезного сигнала и элементы с избыточным шумом. На рис. 4, а показана гистограмма распределения амплитудных значений разности выходных напряжений с элементов матрицы при открытой и закрытой диафрагме АЧТ.

Гистограмма распределения среднеквадратического отклонения выходных напряжений (шума) с элементов модуля ФПУ в отсутствие ИК-излучения от АЧТ при закрытой диафрагме АЧТ (см. рис. 4, б) имела колоколообразный вид с максимумом и средним значением ~ 6 бит АЦП. Шум элементов матрицы измерялся в отсутствие влияния комнатного фона, когда окно криостата закрывалось зеркальной шторкой. При этом величина шума ограничивалась остаточным фоном от элементов конструкции криостата. Шум элементов мультиплексора с трактом обработки сигналов до присоединения кристалла матрицы составлял величину $\sim 3,7$ бит АЦП (среднее значение симметричной относительно максимума гистограммы, 1 бит АЦП соответствовал величине напряжения 134 мкВ или количеству зарядов ~ 50 электронов). Слева от максимума расположена группа элементов с пониженной чувствительностью, справа от максимума расположена группа дефектных

элементов с большим уровнем тока (текущие элементы).

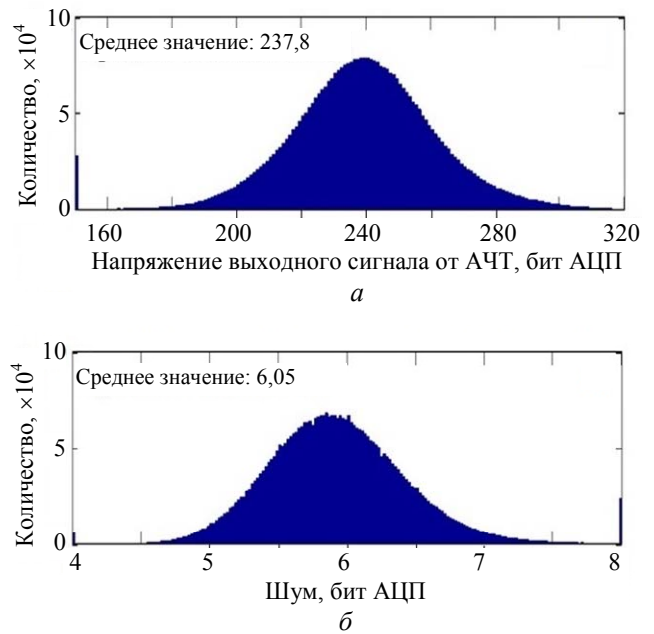


Рис. 4. Гистограммы распределения напряжений выходного сигнала по элементам матрицы от АЧТ (а) и шума по элементов модуля ФПУ (б).

Гистограмма распределения напряжений выходного сигнала с элементов матрицы при комнатном фоне через охлаждаемый узкополосный фильтр величиной $\sim 2,4 \times 10^{-5} \text{ Вт/см}^2$ и закрытой диафрагмой АЧТ также имела колоколообразный вид с максимумом и средним значением около 5000 бит АЦП.

На рис. 5 показана гистограмма обнаружительной способности элементов полупроводниковой матрицы среднего спектрального диапазона при температуре ~ 94 К.

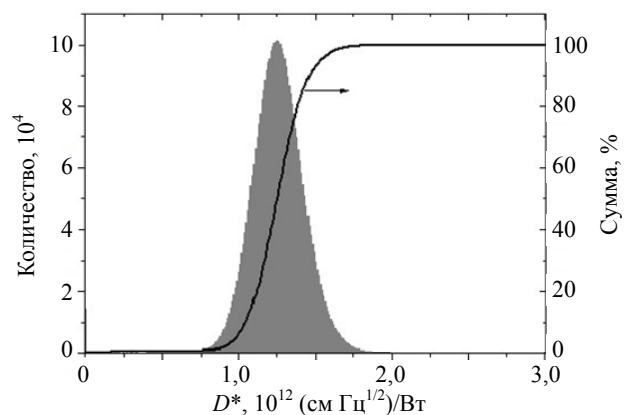


Рис. 5. Гистограмма распределения обнаружительной способности D^* по элементам полупроводниковой матрицы.

Гистограмма имела колоколообразный вид с максимумом и средним значением $\sim 1,3 \times$

$\times 10^{12}$ (см Гц^{1/2})/Вт, и СКО $\sim 0,2 \times 10^{12}$ (см Гц^{1/2})/Вт. Следует заметить, что при измерениях не учитывались потери полезного фотосигнала за счет отражения от оптического окна криостата и отражения от несущей кремниевой подложки, на которую не наносилось просветляющее покрытие.

Заключение

Представлены параметры отечественного мегапиксельного фотоприемного устройства среднего ИК-диапазона, выполненного в виде гибридной микросхемы, состоящей из полупроводниковой HgCdTe матрицы на кремниевой подложке и микросхемы кремниевого мультиплексора.

Высокая чувствительность и однородность чувствительности элементов модуля ФПУ (4×10^6 элементов) позволяет использовать его в составе диагностической аппаратуры, например, в инфракрасных телескопах для наблюдения удаленных небесных тел. Применение кремниевой подложки для выращивания чувствительного слоя HgCdTe позволило существенно снизить механические напряжения, обычно вызываемые разными коэффициентами температурного расширения кристалла фокальной матрицы и кремниевого кристалла мультиплексора, что часто приводит к нарушению электрического контакта встречных индиевых столбиков матрицы и мультиплексора.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Shen-EnQian (Ed.) Optical Payloads for Space Missions*, P. 1296. – Canadian Space Agency, Canada. John Wiley & Sons, Ltd., 2016.
2. *Auyeung J., Beletic J., Zandian M. Detectors for the Extremely Large Telescopes Pasadena*, – California. Teledyne Detector Update. 23 October 2015.
3. *Beletic J. W., Blank R., Gulbransen D., Lee D., Loose M., Piquette E. C., Sprafke T., Tennant W. E., Zandian M., Zino J.* // Proc. SPIE. 2008. Vol. 7021. P. 7021OH.
4. *Bangs J., Langell M., Reddy M., Melkonian L., Johnson S., Elizondo L., Rybnicek K., Norton E., Jaworski F., Asbrock J., Baur S.* // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8012. P. 801234.
5. *Tan C. L., Mohseni H.* // *Nanophotonics*. 2018. Vol. 7. No. 1. P. 169.
6. www.sofradir.com
7. *Rubaldo L., Guinedor P., Destefanis A., V., Fougères P., Kapferer A., Sam-giao, D., Dargent L., Kerlain A., Cathignol A., Compain V., Boulard F., Brellier D., Gravrand O.* // Proc. SPIE. 2018. Vol. 10624. P. 106240U.
8. *Shkedy L., Markovitz T., Calahorra Z., Hirsh I., Shtrichman I.* // *Optical Engineering*. 2011. Vol. 50. No. 6. P. 1.
9. *Ziegler J., Bitterlich H., Breiter R., Bruder M., Eich D., Fries P., Wollrab R., Wendler J., Wenisch J.* // Proc. SPIE. 2013. Vol. 8704. P. 87042L.
10. *Wenisch J., Bitterlich H., Bruder M., Fries P., Wollrab R., Wendler J., Breiter R., Ziegler J.* // *J. El. Materials*. 2013. Vol. 42. No. 11. P. 3186.
11. *Ziegler J., Wenisch J., Breiter R., Eich D., Figgemeier H., Fries P., Lutz H., Wollrab R.* // *J. El. Materials*. 2014. Vol. 43. No. 8. P. 2935.
12. *Lutz H., Breiter R., Eich D., Figgemeier H., Fries P., Rutzinger S., Wendler J.* // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9819. P. 98191Y.
13. *D'Souza A. I., Robinson E., Ionescu A. C., Okerlund D.* // Proc. SPIE. 2013. Vol. 8704. P. 87041V.
14. www.selex-es.com
15. *Starr B., Mears L., Fulk C., Getty J., Beuville E., Boe R., Tracy C., Corrales E., Kilcoyne S., Vampola J., Drab J., Peralta R., Doyle C.* // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9915. P. 99152X.
16. *Kovchavisev A. P., Guzev A. A., Tsarenko A. V., Panova Z. V., Yakushev M. V., Marin D. V., Varavin V. S., Vasilyev V. V., Dvoretzky S. A., Sabinina I. V., Sidorov Yu. G.* // *Infrared Physics & Technology*. 2015. Vol. 73. P. 312.
17. *Gravrand O., Rothman J., Cervera C., Baier N., Lobre C., Zanatta J. P., Boulade O., Moreau V., Fieque B.* // *J. El. Materials*. 2016. Vol. 45. No. 9. P. 4532.
18. *Gravrand O., Rothman J., Castelein P., Cervera C., Baier N., Lobre C., De Borniol E., Zanatta P., Boulade O., Moreau V., Fieque B., Chorier P.* // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9819. P. 98191W.
19. *Fulk C., Radford W., Buell D., Bangs J., Rybnicek K.* // *J. El. Materials*. 2015. Vol. 44. No. 9. P. 2977.
20. *Vallone M., Mandurrio M., Goano M., Bertazzi F., Ghione G., Schirmacher W., Hanna S., Figgemeier H.* // *J. El. Materials*. 2015. Vol. 44. No. 9. P. 3056.
21. *Wenisch J., Schirmacher W., Wollrab R., Eich D., Hanna S., Breiter R., Lutz H., Figgemeier H.* // *J. El. Materials*. 2015. Vol. 44. No. 9. P. 3002.
22. *Schirmacher W., Wollrab R., Lutz H., Schallenberg T., Wendler J., Ziegler J.* // *J. El. Materials*. 2014. Vol. 43. No. 8. P. 2778.
23. *Ferron A., Rothman J., Gravrand O.* // *J. El. Materials*. 2013. Vol. 42. No. 11. P. 3303.
24. *Hassis W., Gravrand O., Rothman J., Benahmed S.* // *J. El. Materials*. 2013. Vol. 42. No. 11. P. 3288.
25. *Strong R., Kinch M. A., Armstrong J.* // *J. El. Materials*. 2013. Vol. 42. No. 11. P. 3103.
26. *Pellegrino J. G., DeWames R., Perconti P., Billman C., Maloney P.* // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8353. P. 83532X.
27. *Филиппов С. Н., Болтарь К. О.* // ТРУДЫ МФТИ. 2010. Т. 2. № 1. С. 52.

Megapixel matrix photodetector of the medium IR range

V. M. Bazovkin¹, V. S. Varavin¹, V. V. Vasil'ev¹, A. V. Gluhov², D. V. Gorshkov¹, S. A. Dvoretzky¹, A. P. Kovchavtsev¹, Y. S. Makarov¹, D. V. Marin¹, I. V. Mzhelsky¹, V. G. Polovinkin¹, V. G. Remesnik¹, I. V. Sabinina¹, Yu. G. Sidorov¹, G. Yu. Sidorov¹, A. S. Stroganov¹, A. V. Tsarenko¹, M. V. Yakushev¹, and A. V. Latyshev¹

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

² NPP "Vostok", JSC
276 Dusi Kovalchuk str, Novosibirsk, 630049, Russia
E-mail: gluhov@nzpp.ru

Received October 25, 2018

The characteristics of the MWIR focal plane arrays based on p-type HgCdTe heteroepitaxial layers are reported. The matrix photodetector device is a hybrid microcircuit that consists of a matrix of 2048×2048 elements and a silicon multiplexer connected by indium columns using the Flip Chip method. The maximum detectability is at $\approx 1,3 \times 10^{12}$ (cm Hz^{1/2})/W. The experimental data of reverse current through n-on-p junction in Arrhenius coordinates described by diffusion of charge carriers in temperature range 125–300 K and carrier generation through the deep level located in the middle of the band gap in temperature range 77–125 K.

Keywords: FPA, HgCdTe, IR-matrix, heterostructure, multiplexer, detectability.

REFERENCES

1. *Optical Payloads for Space Missions*. Ed. by Shen-EnQian. (Canadian Space Agency, Canada. 2016 John Wiley & Sons, Ltd). P. 1296.
2. J. Auyeung, J. Beletic, and M. Zandian, *Detectors for the Extremely Large Telescopes Pasadena* (California. Teledyne Detector Update. 23 October 2015).
3. J. W. Beletic, R. Blank, D. Gulbransen, D. Lee, M. Loose, E. C. Piquette, T. Sprafke, W. E. Tennant, M. Zandian, and J. Zino, *Proc. SPIE* **7021**, 7021OH (2008).
4. J. Bangs, M. Langell, M. Reddy, L. Melkonian, S. Johnson, L. Elizondo, K. Rybnicek, E. Norton, F. Jaworski, J. Asbrock, and S. Baur, *Proc. SPIE* **8012**, 801234 (2011).
5. C. L. Tan and H. Mohseni, *Nanophotonics* **7** (1), 169 (2018).
6. www.sofradir.com
7. L. Rubaldo, P. Guinedor, V. Destefanis A., P. Fougères, A. Kapferer, D. Sam-giao, L. Dargent, A. Kerlain, A. Cathignol, V. Compain, F. Boulard, D. Brellier, and O. Gravrand, *Proc. SPIE* **10624**, 106240U (2018).
8. L. Shkedy, T. Markovitz, Z. Calahorra, I. Hirsh, and I. Shtrichman, *Optical Engineering* **50** (6), 1 (2011).
9. J. Ziegler, H. Bitterlich, R. Breiter, M. Bruder, D. Eich, P. Fries, R. Wollrab, J. Wendler, and J. Wenisch, *Proc. SPIE* **8704**, 87042L (2013).
10. J. Wenisch, H. Bitterlich, M. Bruder, P. Fries, R. Wollrab, J. Wendler, R. Breiter, and J. Ziegler, *J. El. Materials* **42** (11), 3186 (2013).
11. J. Ziegler, J. Wenisch, R. Breiter, D. Eich, H. Figgemeier, P. Fries, H. Lutz, and R. Wollrab, *J. El. Materials* **43** (8), 2935 (2014).
12. H. Lutz, R. Breiter, D. Eicha, H. Figgemeier, P. Fries, S. Rutzinger, and J. Wendler, *Proc. SPIE* **9819**, 98191Y (2016).
13. A. I. D'Souza, E. Robinson, A. C. Ionescu, and D. Okerlund, *Proc. SPIE* **8704**, 87041V (2013).
14. www.selex-es.com
15. B. Starr, L. Mears, C. Fulk, J. Getty, E. Beuville, R. Boe, C. Tracy, E. Corrales, S. Kilcoyne, J. Vampola, J. Drab, R. Peralta, and C. Doyle, *Proc. SPIE* **9915**, 99152X (2016).
16. A. P. Kovchavtsev, A. A. Guzev, A. V. Tsarenko, Z. V. PANOVA, M. V. Yakushev, D. V. Marin, V. S. Varavin, V. V. Vasilyev, S. A. Dvoretzky, I. V. Sabinina, and Yu. G. Sidorov, *Infrared Physics & Technology* **73**, 312 (2015).
17. O. Gravrand, J. Rothman, C. Cervera, N. Baier, C. Lobre, J. P. Zanatta, O. Boulade, V. Moreau, and B. Fieque, *J. El. Materials* **45** (9), 4532 (2016).
18. O. Gravrand, J. Rothman, P. Castelein, C. Cervera, N. Baier, C. Lobre, E. De Borniol, P. Zanatta, O. Boulade, V. Moreau, B. Fieque, and P. Chorier, *Proc. SPIE* **9819**, 98191W (2016).
19. C. Fulk, W. Radford, D. Buell, J. Bangs, and K. Rybnicek, *J. El. Materials* **44** (9), 2977 (2015).
20. M. Vallone, M. Mandurrio, M. Goano, F. Bertazzi, G. Ghione, W. Schirmacher, S. Hanna, and H. Figgemeier, *J. El. Materials* **44** (9), 3056 (2015).
21. J. Wenisch, W. Schirmacher, R. Wollrab, D. Eich, S. Hanna, R. Breiter, H. Lutz, and H. Figgemeier, *J. El. Materials* **44** (9), 3002 (2015).
22. W. Schirmacher, R. Wollrab, H. Lutz, T. Schallenberg, J. Wendler, and J. Ziegler, *J. El. Materials* **43** (8), 2778 (2014).
23. A. Ferron, J. Rothman, and O. Gravrand, *J. El. Materials* **42** (11), 3303 (2013).
24. W. Hassis, O. Gravrand, J. Rothman, and S. Benahmed, *J. El. Materials* **42** (11), 3288 (2013).
25. R. Strong, M. A. Kinch, and J. Armstrong, *J. El. Materials* **42** (11), 3103 (2013).
26. J. G. Pellegrino, R. DeWames, P. Perconti, C. Billman, and P. Maloney, *Proc. SPIE* **8353**, 83532X (2012).
27. S. N. Filippov and K. O. Boltar, *TRUDY MFTI* **2** (1), 52 (2010).