

УДК 621.383.4/5

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

Многорядные фотоприемные модули на основе ГЭС HgCdTe для инфракрасных радиометров

Н. И. Яковлева, К. О. Болтарь, И. Д. Бурлаков, А. В. Никонов, Р. В. Давлетшин, С. В. Попов

Проведены исследования темновых токов и шумов фоточувствительных элементов (ФЧЭ) многорядных фотоприемных модулей (ФПМ) на основе гетероэпитаксиальных (ГЭС) структур HgCdTe с шагом 28 мкм средневолнового и длинноволнового ИК-диапазонов спектра при обратном напряжении смещения $V = -0,1$ В. Показано, что значение обнаружительной способности $D^ \geq 10^{12}$ см Вм⁻¹ Гц^{1/2} для ФПМ средневолнового диапазона достигается при темновых токах менее 10^{-11} А. Измерены зависимости фотосигнала и шума от времени накопления для ФПМ длинноволнового ИК-диапазонов спектра. Показано, что фотосигнал растет линейно в зависимости от времени накопления в диапазоне $T_{\text{нак}} = 25\text{--}200$ мкс, а шум возрастает приблизительно в $\sqrt{2}$ раз.*

Ключевые слова: инфракрасный радиометр, HgCdTe, гетероэпитаксиальная структура, матрица фоточувствительных элементов, МФЧЭ, фотоприемный модуль, ФПМ, темновой ток.

Ссылка: Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Никонов А. В., Давлетшин Р. В., Попов С. В. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 29.

Reference: N. I. Iakovleva, K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. V. Nikonov, R. V. Davletshin, and S. V. Popov, Prikl. Fiz., No. 6, 29 (2018).

Введение

В основу принципа действия инфракрасных радиометров положено преобразование ИК-излучения от объектов наблюдения в электрические сигналы, на основе которых формируется видимое

изображение или задается механизм обработки параметров наблюдаемых объектов при различных фоновых потоках. Для работы в заданных диапазонах ИК-области спектра радиометры включают в свой состав специальные крупноформатные, высокочувствительные фотоприемные модули (ФПМ), использующие матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) с обработкой данных в БИС считывания [1–3].

Среди различных полупроводниковых материалов, чувствительных в ИК-области спектра, тройные растворы HgCdTe являются лучшим полупроводниковым соединением с точки зрения достижения максимальных фотоэлектрических параметров [4, 5] в заданных ИК-диапазонах спектра, что связано с выбором архитектуры фоточувствительных элементов с уменьшенным влиянием тепловых процессов при детектировании излучения. Выделение рабочих спектральных диапазонов может осуществляться как с помощью оптических фильтров, так и с помощью выбора состава x для области поглощения, определяющего заданную граничную длину волны. При использовании в ИК-радиометрах многорядных МФЧЭ возможна реализация аналогового режима временной задержки и накопления (ВЗН) и предварительная обработка данных непосредственно в электронике считывания с уменьшением объема выводимых данных.

Яковлева Наталья Ивановна¹, г.н.с. НИЦ, к.т.н.

Болтарь Константин Олегович^{1,2}, нач. НТК, профессор, д.ф.-м.н.

Бурлаков Игорь Дмитриевич^{1,3}, зам. ген. директора по инновациям и науке, профессор.

Никонов Антон Викторович^{1,2}, нач. НИЦ, зам. зав. кафедрой, доцент, к.ф.-м.н.

Давлетшин Ренат Валиевич^{1,2}, инженер 2 кат. НИЦ, аспирант.

Попов Сергей Викторович⁴, первый зам. ген. директора – зам. по НИОКР и инновационному развитию.

¹ АО «НПО «Орион».

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

E-mail: ogion@ogion-ir.ru

² Московский физико-технический институт

(государственный университет).

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

³ МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

⁴ Холдинг «Швабе».

Россия, 129366, Москва, Проспект Мира, 176.

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2018 г.

© Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Никонов А. В., Давлетшин Р. В., Попов С. В., 2018

Целью данной работы являлось рассмотрение отдельных характеристик многоярких ФПМ на основе HgCdTe различных форматов с шагом 28 мкм, работающих в средневолновом и длинноволновом диапазонах.

ФПМ средневолнового ИК-диапазона спектра

ФПМ средневолнового ИК-диапазона спектра $\Delta\lambda = 3,5\text{--}4,1$ мкм форматов 288×4 , 576×4 , 576×6 и др. с шагом от 28 мкм, работающие в режиме временной задержки и накопления с замещением дефектных элементов в БИС считывания, используются для работы в реальном режиме времени с возможностью формирования изображений с кадровой частотой ~ 100 Гц.

ФПМ данного спектрального диапазона изготавливались на основе структур HgCdTe (КРТ) с поглощающим слоем состава $x = 0,29$ мол. дол., который определял длинноволновую границу фоточувствительности [6, 7]. Для формирования коротковолновой границы ФПМ комплектовались узкополосными фильтрами, в соответствии с пропусканием которых спектральная чувствительность при $T = 80$ К представляла характеристику, показанную на рис. 1.

На рис. 1 показано, что спектральная чувствительность ФПМ перекрывает поддиапазон $\Delta\lambda = 3,5\text{--}4,1$ мкм. Измерения темнового тока и дифференциального сопротивления в зависимости от напряжения смещения проводились в температурном диапазоне $\Delta T = 110\text{--}70$ К. Результаты представлены на рис. 2.

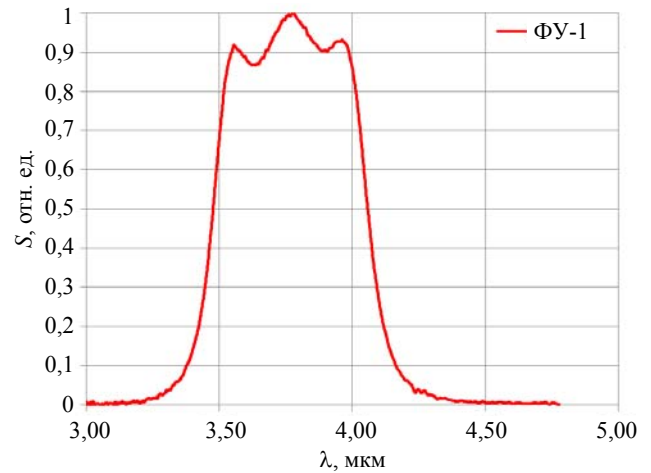
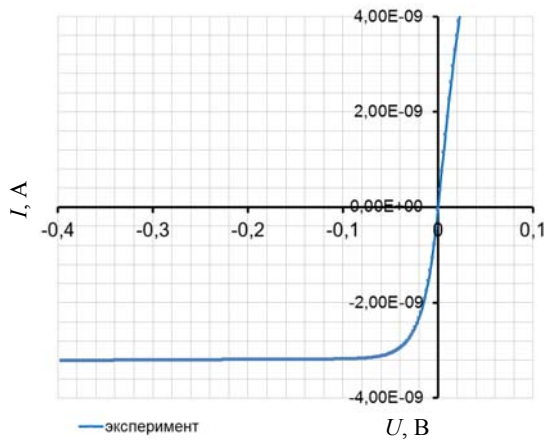
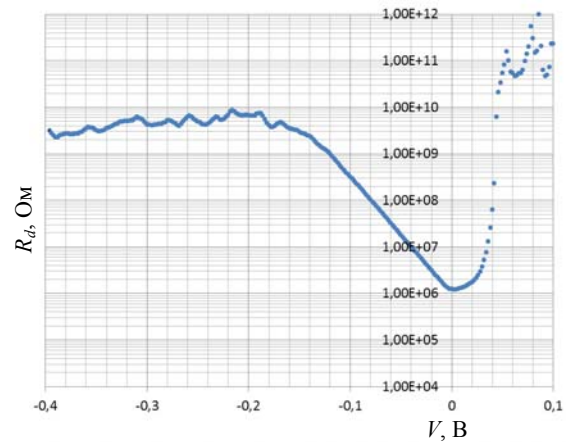


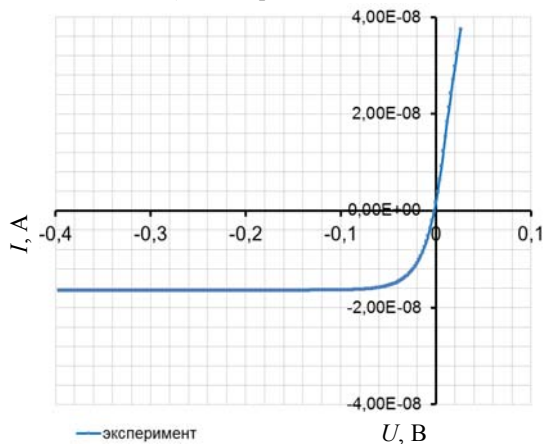
Рис. 1. Характеристика спектральной чувствительности S для ФПМ средневолнового ИК-диапазона спектра.



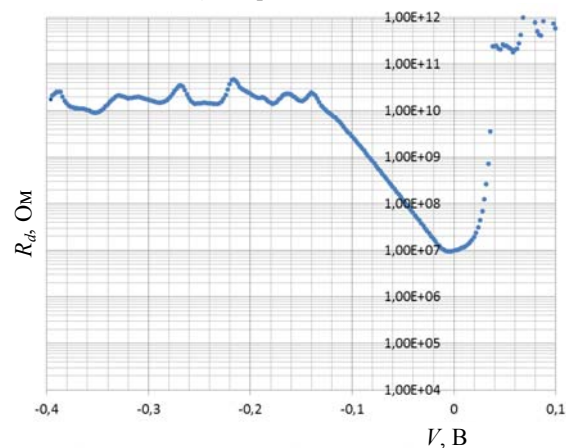
а) ВАХ при $T = 110$ К



б) R_d при $T = 110$ К

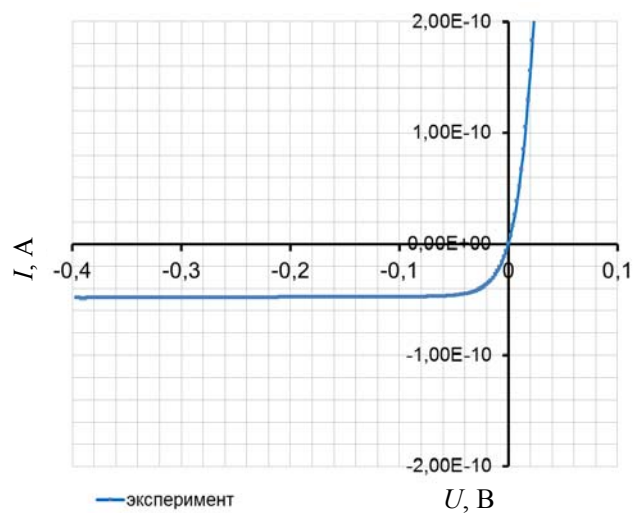


в) ВАХ при $T = 100$ К

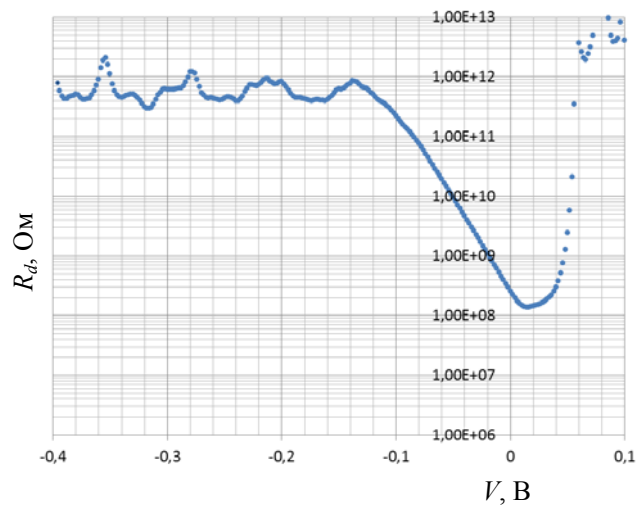


г) R_d при $T = 100$ К

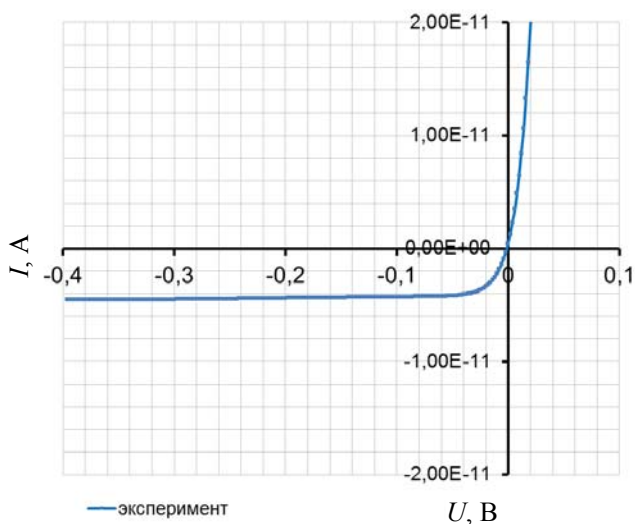
Рис. 2. Температурные измерения ВАХ и дифференциального сопротивления ФПМ средневолнового спектрального ИК-диапазона спектра.



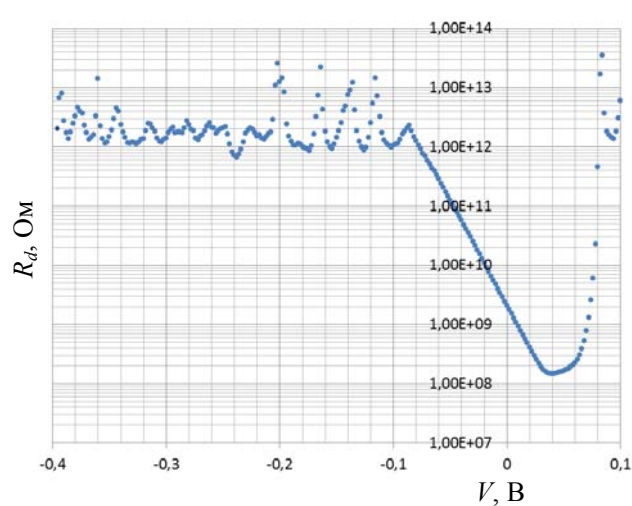
д) ВАХ при $T = 90$ К



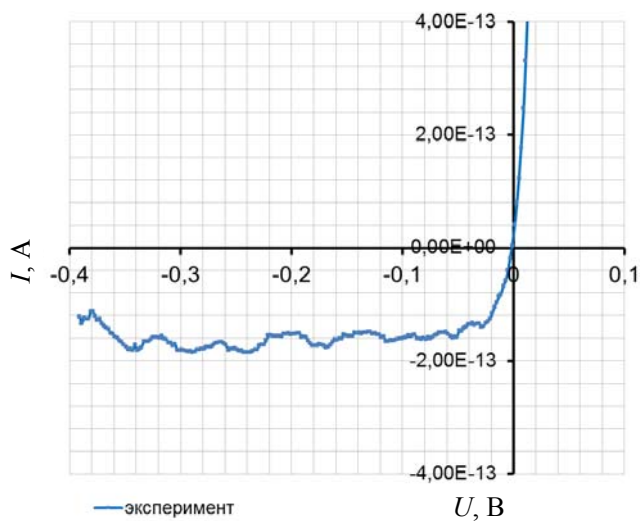
е) R_d при $T = 90$ К



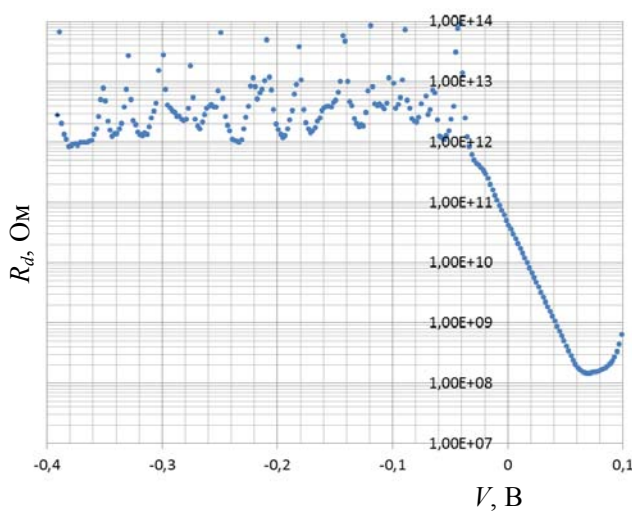
ж) ВАХ при $T = 80$ К



з) R_d при $T = 80$ К



и) ВАХ при $T = 70$ К



к) R_d при $T = 70$ К

Рис. 2. Окончание.

В таблице представлены данные измерений темнового тока и дифференциального сопротивления в рабочей точке при обратном напряжении смещения $V = -100$ мВ, а также оценка обнаружительной способности.

На рис. 3 показана температурная зависимость темнового тока для исследованного образца при обратном напряжении смещения $V = -0,1$ В. Показано, что темновой ток в зависимости от температуры резко изменяется от $1,5 \times 10^{-8}$ А при

$T = 110$ К до $1,65 \times 10^{-13}$ А при $T = 70$ К. Значение фонового тока в данном спектральном диапазоне по предварительным оценкам составляет $I_{\phi} \approx 0,36$ нА при нормальных климатических условиях. Для работы в VLIP-режиме значение темнового тока должно быть как минимум в 5 раз меньше. По графику (см. рис. 3) видно, что работа в VLIP-режиме в данном спектральном диапазоне будет обеспечена при охлаждении ФПМ до температуры $T = 80$ К.

Таблица

Характеристики ФПМ

№ измерения	Температура, К	Темн. ток ($V = -0,1$ В), нА	Диф. сопр. ($V = -0,1$ В), мОм	Оценка D^* по ВАХ ($V = -0,1$ В), см Вт $^{-1}$ Гц $^{1/2}$
506-800	110	1,52E+01	2,60E+02	3,64E+10
506-820	105	7,22E+00	6,53E+02	5,29E+10
506-840	100	3,14E+00	2,19E+03	8,02E+10
506-860	95	1,21E-01	6,13E+04	4,07E+11
506-880	90	4,93E-02	1,76E+05	6,40E+11
506-900	85	1,62E-02	6,04E+05	1,12E+12
506-920	80	4,17E-03	1,14E+06	2,20E+12
506-940	75	8,51E-04	2,33E+06	4,86E+12
506-960	70	1,65E-04	1,05E+07	1,10E+13

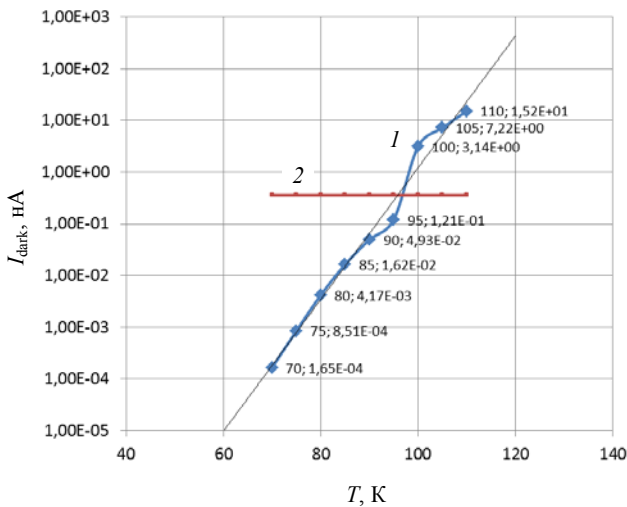


Рис. 3. Температурные зависимости темнового тока ФПМ средневолнового спектрального диапазона $\Delta\lambda = 3,5 - 4,1$ мкм № 506. Кривая 1 – темновой ток; кривая 2 – ток фона.

На рис. 4 представлена зависимость обнаружительной способности D^* от темнового тока, причём изменение обнаружительной способности в заданном диапазоне температур составляет примерно три порядка. Показано, что значение обнаружительной способности более $D^* = 10^{12}$ см Вт $^{-1}$ Гц $^{1/2}$ обеспечивается при значениях темнового тока не более $I_{\text{dark}} \leq 10^{-11}$ А, что реализуется при охлаждении ФЧЭ до температуры $T \leq 80$ К.

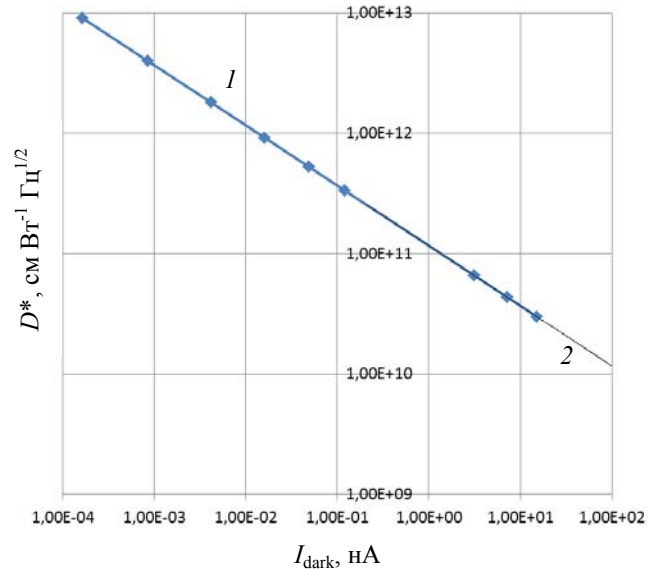


Рис. 4. Зависимость обнаружительной способности D^* от темнового тока. Кривая 1 – ряд 1; кривая 2 – степенная (ряд 1).

Для достижения значений темнового тока порядка $I_{\text{dark}} \sim 10^{-12}$ А и обнаружительной способности $D^* \geq 10^{12}$ см Вт $^{-1}$ Гц $^{1/2}$ необходимо обеспечить емкость накопления в ячейке БИС считывания порядка десятков фФ, что в 10 раз меньше емкостей в используемой БИС считывания.

ФПМ длинноволнового ИК-диапазона спектра

Для длинноволнового ИК-диапазона спектра ($\Delta\lambda = 9,8\text{--}11,0$ мкм) используются гетероструктуры КРТ с поглощающим слоем состава $x = 0,22$ мол. дол. [8]. Спектр фоточувствительности ФПМ данного спектрального диапазона при $T = 80$ К представлен на рис. 5.

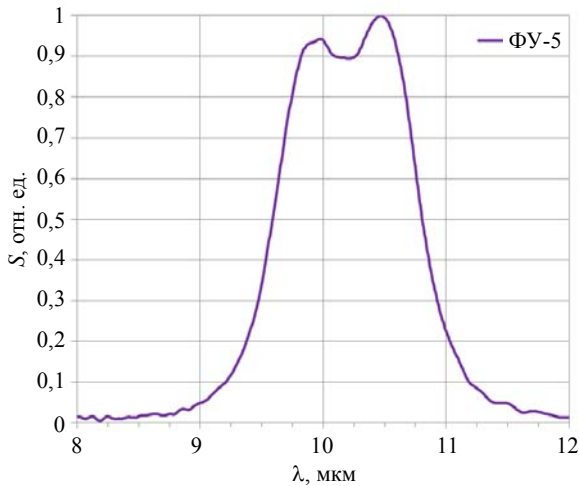


Рис. 5. Характеристика спектральной чувствительности ФПМ длинноволнового спектрального ИК-диапазона $\Delta\lambda = 9,8\text{--}11,0$ мкм при $T = 80$ К.

Измерения выходного сигнала и шума для линейки фотодиодов из 144 элементов с шагом 28 мкм проводились от АЧТ с температурой $T = 500$ К в зависимости от времени накопления, изменяющегося в диапазоне $T_{\text{нак}} = 25\text{--}200$ мкс. На рис. 6 представлена зависимость среднего значения фотосигнала от времени накопления.

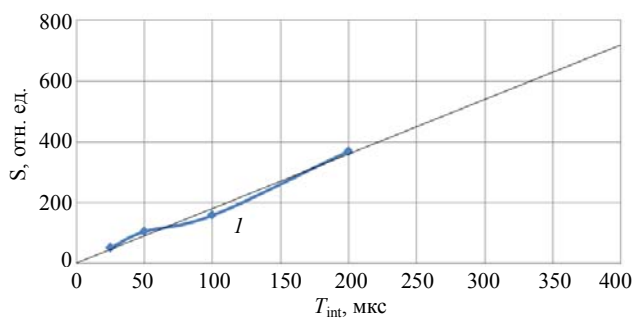


Рис. 6. Зависимость среднего значения фотосигнала S от времени накопления для линейки фотодиодов из 144 элементов с шагом 28 мкм. Кривая 1 — сигнал.

Показано, что фотосигнал растет линейно в зависимости от времени накопления в диапазоне $T_{\text{нак}} = 25\text{--}200$ мкс.

На рис. 7 представлена зависимость шума от времени накопления, изменяющегося в диапазоне $T_{\text{нак}} = 25\text{--}400$ мкс, для линейки фотодиодов из 144 элементов с шагом 28 мкм; шумы в зависимости от времени накопления растут примерно в 1,5 раза.

Измерения показали, что шум прибора включает шум элемента ФЧЭ и ячейки считывания мультиплексора. Определено соотношение этих шумов для многорядных ФПМ, причём при правильной конструкции ячейки считывания шум в зависимости от времени накопления растет примерно в $\sqrt{2}$ раз. Для достижения высоких выходных параметров ФПМ шум ячейки считывания должен быть существенно меньше шума фотодиода, а емкость накопления ячейки считывания для ФПМ длинноволнового диапазона должна быть менее 10 фФ.

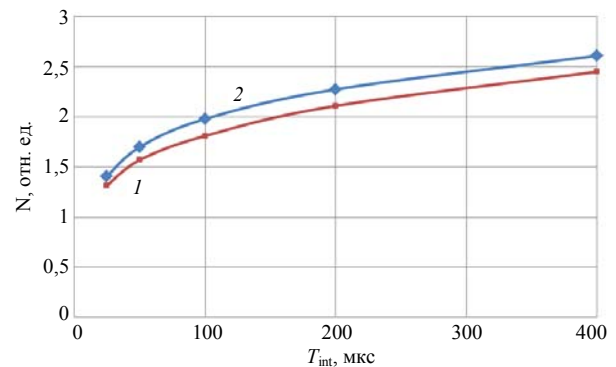


Рис. 7. Зависимость среднего значения шума N от времени накопления для линейки фотодиодов из 144 элементов с шагом 28 мкм и суммарный шум прибора. Кривая 1 — шум ФПУ; кривая 2 — суммарный шум.

Заключение

Для включения в состав инфракрасного радиометра изготовлены по планарной технологии на основе гетероэпитаксиальных структур с поглощающим слоем HgCdTe p -типа проводимости ФПМ, чувствительные в средневолновом и длинноволновом ИК-диапазонах спектра.

Для ФПМ на основе $\text{Hg}_{0,71}\text{Cd}_{0,29}\text{Te}$ средневолнового спектрального диапазона $\Delta\lambda = 3,5\text{--}4,1$ мкм измерена температурная зависимость темнового тока в диапазоне $\Delta T = 110\text{--}70$ К. Показано, что значение обнаружительной способности $D^* = 10^{12}$ см Вг⁻¹ Гц^{1/2} обеспечивается при значении темнового тока менее $I_{\text{тем}} \leq 10^{-11}$ А, которое реализуется при условии охлаждения ФЧЭ до температуры $T \sim 80$ К.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования величин и источников выходного шума ФПМ длинноволнового ИК-диапазона спектра в зависимости от времени накопления. Показано, что шум прибора включает шум ФЧЭ и входной ячейки считывания мультиплексора. Шум фотодиода в зависимости от времени накопления растет примерно в $\sqrt{2}$ раз. Он включает шум ячейки считывания, который должен быть существенно меньше шума фотодиода, а емкость

накопления ячейки считывания для ФПМ длинноволнового диапазона должна быть менее 10 фФ.

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. // Optical Memory and Neural Networks (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., **68**, 2267 (2005).
5. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Филачев А. М., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 61.
6. Denisov I. A., Lakeenkov V. M., Mazhorova O. S., Smirnova N. A. // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4340. P. 223.
7. Члясов 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.
8. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Варавин В. С., Васильев В. В., Сусяков А. О., Овсяк В. Н., Якушев М. В. // Прикладная физика. 2000. № 5. С. 121.

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

HgCdTe photodiode arrays for infrared radiometers

N. I. Yakovleva¹, K. O. Boltar^{1,2}, I. D. Burlakov^{1,3}, A. V. Nikonov^{1,2}, R. V. Davletshin^{1,2}, and S. V. Popov⁴

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

³ MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA)
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

⁴ Shvabe Holding
176 Prospekt Mira, Moscow, 129366, Russia

Received November 30, 2018

Dark currents and noise characteristics of the linear photodiode array with 28 μm pitch formed in MWIR and LWIR HgCdTe heteroepitaxial structures have been investigated. It is shown that the detectivity of MWIR FPA come up to $10^{12} \text{ cm W}^{-1} \text{ Hz}^{1/2}$ at dark currents less than 10^{-11} A . The dependences of the photosignal and noise for LWIR FPA have been measured versus integration time. The photosignal grows linearly in the range of $\Delta T_{\text{int}} = 25\text{--}200 \mu\text{s}$, and the noise increases approximately in $\sqrt{2}$ times.

Keywords: infrared, radiometer, HgCdTe, heteroepitaxial structures, HES, Focal Plane Array, FPA, linear photodiode array, dark current.

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. Stafeev, Optical Memory and Neural Networks (Information Optics) **16** (4), 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** (1), 9 (2008).
4. A. Rogalski, Rep. Prog. Phys. **68**, 2267 (2005).
5. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, and N. I. Yakovleva, Prikl. Fiz., No. 3, 61 (2012).
6. I. A. Denisov, V. M. Lakeenkov, O. S. Mazhorova, and N. A. Smirnova, Proc. SPIE **4340**, 223 (2000).
7. A. V. Chilyasov, A. N. Moiseev, B. S. Stepanov, K. E. Savlinov, A. P. Kotkov, and N. D. Grishnova, Usp. Prikl. Fiz. **1** (2), 213 (2013).
8. Yu. G. Sidorov, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, M. V. Yakushev, V. S. Varavin, N. G. Vaciliev, A. O. Suslyakov, and V. N. Ovsyuk, Prikl. Fiz., No. 5, 121 (2000).