

УДК 621.383.4/5:621.315.59

Фотоэлектрические характеристики МФПУ на основе эпитаксиальных слоев антимонида индия на высоколегированной подложке

И. Д. Бурлаков, К. О. Болтарь, П. В. Власов, А. А. Лопухин,
А. И. Торопов, К. С. Журавлев, В. В. Фадеев

Исследованы фотоэлектрические характеристики матричного фотоприемного устройства формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм с фоточувствительным элементом, изготовленным в эпитаксиальном слое антимонида индия на высоколегированной подложке. Среднее значение эквивалентной шуму разности температур при относительном отверстии диафрагмы 1:0,94 и времени накопления 1,46 мс составило 10,5 мК, количество дефектных элементов — 0,12 %, время корректируемости — более трех часов. Проведено сравнение данного МФПУ с аналогичными серийными МФПУ на основе объемного антимонида индия.

PACS: 07.07.Df, 07.57.-c, 81.05.Ea, 81.65.Rv

Ключевые слова: МФПУ, эпитаксиальный антимонид индия, фотоэлектрические характеристики.

Введение

Наибольшее количество матричных фотоприемных устройств (МФПУ) средневолнового ИК-диапазона изготавливаются на основе фотодиодов из антимонида индия InSb [1—3]. Матри-

цы фотодиодов из InSb отличаются высокой однородностью свойств по площади, меньшим количеством дефектных элементов и более низкой ценой в сравнении с аналогичными устройствами. Развитие новых методов выращивания InSb, и прежде всего молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), позволило решить ряд технологических проблем и создать крупноформатные матрицы фотодиодов.

МЛЭ позволяет также оптимизировать характеристики детекторов путем создания многослойных эпитаксиальных структур с заданным распределением по толщине типа проводимости и концентрации примеси [4—6].

Наиболее значимыми потенциальными преимуществами МФПУ на основе эпитаксиальных структур антимонида индия являются:

- уменьшение взаимосвязи элементов [7—9];
- уменьшение динамической взаимосвязи [10];
- уменьшение дефектности;
- повышение температуры криостатирования.

В АО «НПО «Орион» разработано и выпускается серийно МФПУ на основе объемного InSb формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм с охладителем типа «интегральный Стирлинг» и блоком сопряжения [11—13].

В данной работе исследованы фотоэлектрические характеристики аналогичного МФПУ, в котором фоточувствительный элемент изготовлен в эпитаксиальном слое InSb на высоколегированной подложке. Проведены измерения характеристики относительной спектральной чувствитель-

Бурлаков Игорь Дмитриевич, зам. ген. директора по инновациям и науке¹, профессор².

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК¹, профессор³.

Власов Павел Валентинович, ведущий инженер¹.

Лопухин Алексей Алексеевич, начальник участка измерений¹.

Торопов Александр Иванович, заведующий лабораторией⁴.

Журавлев Константин Сергеевич, ведущий научный сотрудник⁴.

Фадеев Владислав Викторович, зам. ген. директора по науке⁵.

¹ АО «НПО «Орион».

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

Тел. 8 (499) 374-94-00. Факс 8 (499) 373-68-62.

E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский технологический университет (МИРЭА).

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

³ Московский физико-технический институт (МФТИ).

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

⁴ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.

Россия, Новосибирск, 630090, пр. ак. Лаврентьева, 13.

Тел. 8 (383) 333-24-72. Факс 8 (383) 333-27-71.

E-mail: ifp@isp.nsc.ru

⁵ НТЦ ВДМ-ТЕХНОЛОГИИ.

Россия, 121002, Москва, пер. Карманицкий, 9.

Статья поступила в редакцию 02 июня 2016 г.

© Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А., Торопов А. И., Журавлев К. С., Фадеев В. В., 2016

ности, коэффициента фотоэлектрической взаимосвязи, вольтамперной характеристики структуры «фотодиод—согласующий транзистор», динамической взаимосвязи («эффект памяти») и долговременной стабильности МФПУ. Получены зависимости сигнала, шума и среднего значения эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ) МФПУ от времени накопления, значения дефектности, максимального кластера, квантового выхода, темнового тока и т. д.

Эпитаксиальный антимонид индия

Для изготовления активного элемента МФПУ (т. е. матрицы фотодиодов из InSb) использовалась гибридная технология. Нелегированный активный слой выращивался методом МЛЭ на высоколегированных подложках n^+ -InSb в ИФП СО РАН (Новосибирск), а p -слой формировался имплантацией ионов Be^+ в АО «НПО «Орион» (Москва). Для изготовления матриц на основе

полученных эпитаксиальных структур использовалась мезотехнология с глубиной разделения элементов ~ 1 мкм. Матрицы фоточувствительных элементов гибридизировались индиевыми микроконтактами с БИС считывания формата 320×256 элементов. Далее подложка утоньшалась по отработанной технологии для объемных МФПУ до толщины ~ 15 мкм и просветлялась с помощью напыления ZnS с тыльной стороны.

Фотоэлектрические характеристики МФПУ

В табл. 1 приведены значения основных фотоэлектрических параметров МФПУ на основе эпитаксиально выращенного и объемного InSb. Для МФПУ на основе объемного InSb приводятся средние значения по серийно выпускаемым изделиям.

Фотоэлектрические характеристики матричных фотоприемников были измерены при температуре 80 К.

Таблица 1

Наименование параметра, ед. изм.	МФПУ на эпитаксиальном InSb	МФПУ на объемном InSb
Время накопления, соответствующее уровню 0,7 от насыщения сигнала (при относительном отверстии охлаждаемой диафрагмы 1:1), мс	1,46	0,54
Среднее значение эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ), мК	10,5	11,4
Вольтовая чувствительность $S_{u, \max}$, В/Вт	$4,8 \times 10^8$ ($T_n = 0,35$ мс)	$6,7 \times 10^8$ ($T_n = 0,33$ мс)
Разброс чувствительности $Std/\langle Su \rangle$, %	6,9	3,9
Количество дефектных элементов, %	0,12	0,24
Максимальный кластер, эл.	3	15
Длинноволновая граница спектральной чувствительности по уровню 0,5, мкм	4,92	4,98
Коротковолновая граница спектральной чувствительности по уровню 0,5, мкм	4,32	2,93
Квантовый выход, %	56	85
Коэффициент фотоэлектрической взаимосвязи, %	9	13
МРРТ (14 штрих/мм), мК	100	240
Темновой ток, пА	24,5	8
Динамическая взаимосвязь, %	1,9	0,8

На рис. 1 показаны характеристика относительной спектральной чувствительности МФПУ на основе эпитаксиальной структуры RC1151 (кривая 1), а также спектр пропускания высоколе-

гированной подложки толщиной 500 мкм (кривая 2) (концентрация легирующей примеси $(1,9 \div 3,1) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$) и атмосферы (кривая 3).

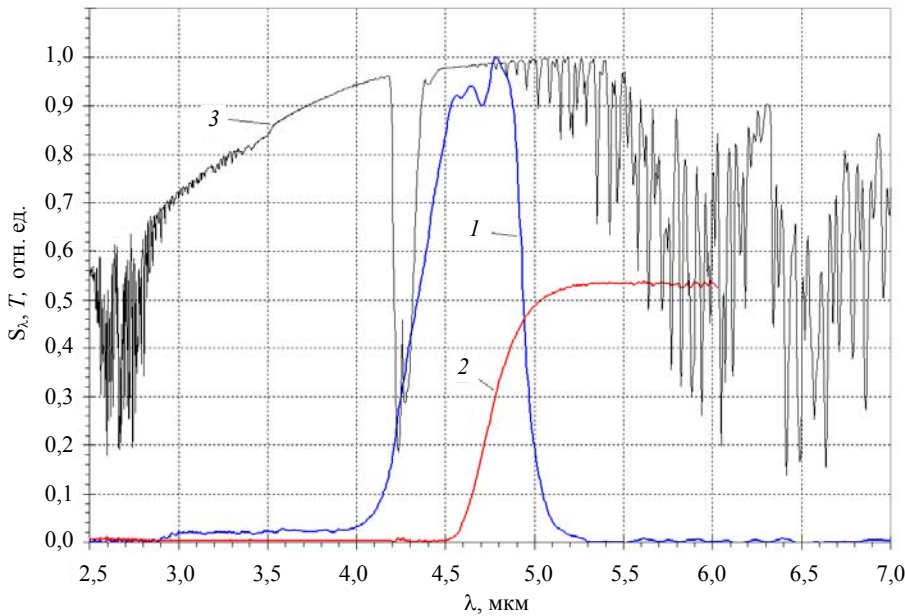


Рис. 1. Характеристика относительной спектральной чувствительности $S_{\lambda, T}$ МФПУ на основе эпитаксиальной структуры при температуре 80 К (1), спектры пропускания T высоколегированной подложки (2) и атмосферы (3).

Видно, что степень легированности подложки подобрана так, что коротковолновая граница спектра пропускания подложки при температуре 80 К составляет 4,75 мкм по уровню 0,5. При утоньшении подложки до 12 мкм коротковолновая граница чувствительности МФПУ сдвигается до 4,35 мкм и попадает непосредственно в окно пропускания атмосферы, не пересекаясь при этом с линией поглощения CO_2 (4,2 мкм). Сдвиг границы чувствительности достигнут за счет утоньшения

подложки до толщины 12 мкм. Длинноволновая граница спектральной чувствительности МФПУ определяется охлаждаемым оптическим фильтром.

На рис. 2 представлены зависимости от времени накопления среднего значения сигнала МФПУ (кривая 1), среднеквадратического значения шума МФПУ (кривая 2), расчетного шума в VLIP-режиме (кривая 3) и шума фотодиодов, полученного при вычитании из шума МФПУ шума электроники (кривая 4).

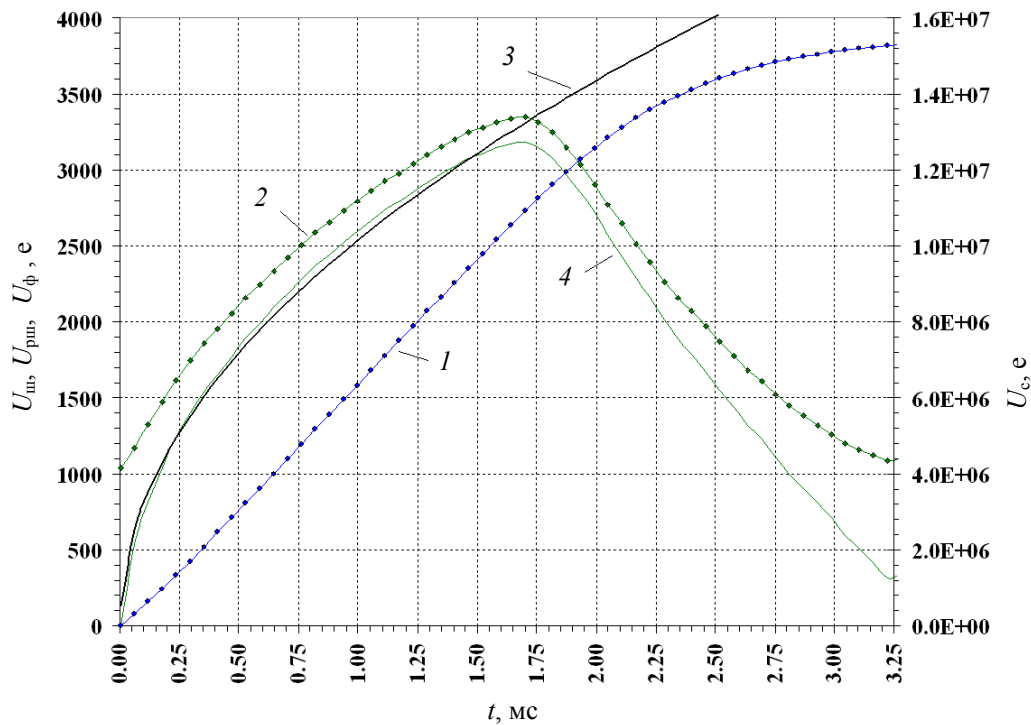


Рис. 2. Зависимости от времени накопления t значений сигнала U_c (1), шума $U_{ш}$ (2), расчетного шума $U_{рш}$ в VLIP-режиме (3) и шума фотодиодов U_{ϕ} (4), полученного при вычитании из шума МФПУ шума электроники.

Шум на накопительном конденсаторе в ячейке МФПУ при нулевом времени накопления составляет ~1000 электронов. Из графика видно хорошее совпадение теоретического значения шума, ограниченного флуктуациями фонового излучения, и значения, полученного вычитанием по квадратам из шума МФПУ шума электроники. Это

свидетельствует об отсутствии избыточных собственных шумов фотодиодов и некоррелированности шума фотодиодов и электроники БИС считывания.

На рис. 3 представлены зависимости ЭШРТ от времени накопления для МФПУ на объемном (кривая 1) и эпитаксиальном (кривая 2) InSb.

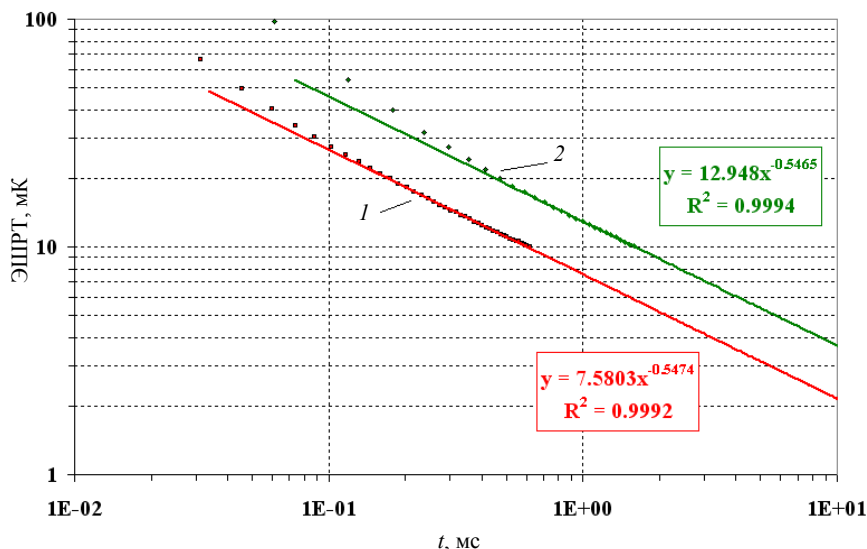


Рис. 3. Зависимости ЭШРТ ($df = 1:0,94$, $T_{фон} = 300$ К) МФПУ на основе объемного материала (1) и эпитаксиальной структуры (2) от времени накопления t .

В диапазоне рабочих времен накопления на обоих МФПУ наблюдается близкая к корневой зависимость ЭШРТ от времени накопления, что также свидетельствует о работе МФПУ в режиме, ограниченном флуктуациями фонового излучения (BLIP).

Среднее значение ЭШРТ при относительном отверстии 1:0,94 на кадровой частоте при 100 Гц при времени накопления 1,5 мс составило 10,5 мК, что совпадает с ЭШРТ МФПУ на объемном антимониде индия при времени накопления 0,6 мс.

Вольтовая чувствительность исследуемого МФПУ оказалась существенно меньше, что обу-

словлено неоптимальной толщиной фоточувствительного слоя и ограничением коротковолновой границы фоточувствительности значением 4,3 мкм из-за поглощения в подложке. Как показано на рис. 4, дефектность лучших образцов МФПУ на эпитаксиальных слоях составила 0,12 %, что меньше средней дефектности МФПУ на объемном антимониде индия. Аналогично, максимальный кластер дефектных элементов оказался меньше для МФПУ с эпитаксиальным InSb. Корректное сравнение дефектности МФПУ на эпитаксиальном и объемном InSb возможно при количественном увеличении выпуска МФПУ на эпитаксиальном InSb.

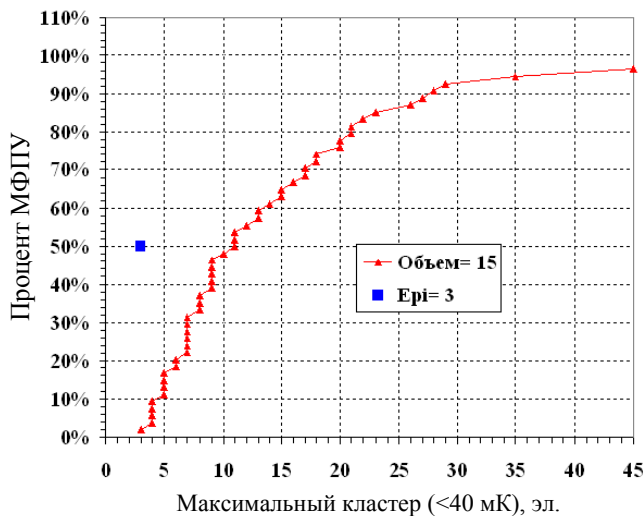
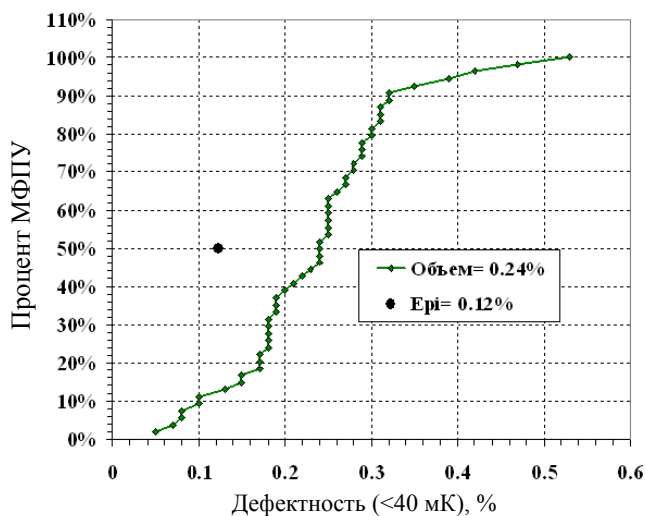


Рис. 4. Интегральные распределения дефектности (слева) и максимального кластера дефектных элементов (справа) МФПУ на основе эпитаксиальной структуры и объемного материала.

Для уменьшения дефектности и темновых токов, повышения однородности характеристик МФПУ необходимо совершенствовать технологию подготовки подложки перед эпитаксией и качество пассивации поверхности мезаструктур, осуществлять формирование $p-n$ -переходов в процессе роста.

Долговременная стабильность МФПУ

Временной и пространственной шумов ограничивают температурное разрешение МФПУ. В отличие от временного шума, который определяется фоновым потоком, пространственный шум является следствием неоднородности характеристик отдельных элементов МФЧЭ, связанной с различной чувствительностью отдельных ее элементов, а также рядом других факторов.

Проведены экспериментальные измерения долговременной стабильности в течение трех часов после проведения двухточечной коррекции неоднородности. Получена временная зависимость показателя корректируемости C после двухточечной коррекции, который определяется как отно-

шение пространственных шумов к временным и является критерием качества коррекции и долговременной стабильности МФПУ. Значение показателя C меньше единицы показывает, что пространственный шум меньше уровня временного шума.

Временные шумы МФПУ на основе эпитаксиальной структуры практически не меняются со временем. За время работы наблюдаются флуктуации и незначительное возрастание пространственного шума и, соответственно, показателя корректируемости.

На рис. 5 приведены зависимости временного шума, геометрического шума и показателя корректируемости от времени работы МФПУ на основе эпитаксиальной структуры RC1151 для элементов, расположенных в центре МФЧЭ в круге диаметром 128 пикселей. В этой области пространственный шум и показатель корректируемости растут не так резко, как по всей площади МФЧЭ. В случае оценки долговременной стабильности по всей площади МФЧЭ время долговременной стабильности будет меньше из-за эффекта «паразитного излучения» в периферийных областях МФЧЭ [14].

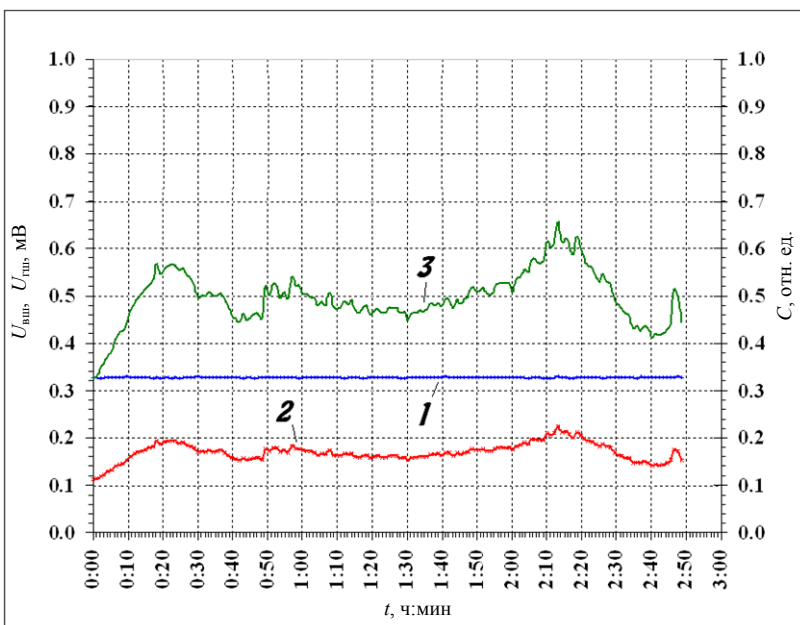


Рис. 5. Зависимости временного шума $U_{вн}$ (1), геометрического шума $U_{гн}$ (2) и показателя корректируемости C (3) от времени t работы МФПУ на основе эпитаксиальной структуры.

Показатель корректируемости для центральных элементов МФПУ не достигает единицы через 2 часа 50 минут. Стоит отметить, что флуктуации геометрического шума во время работы, вероятнее всего, объясняются изменением внешних условий (например, температуры окружающей среды) при измерениях.

Заключение

Исследованы МФПУ на основе эпитаксиальных слоев антимонида индия InSb, полученных

молекулярно-лучевой эпитаксией, которые сравнены с аналогами на объемном InSb. Получены следующие основные результаты.

- Взаимосвязь элементов эпитаксиальных МФПУ меньше, чем объемных.
- Фоточувствительные характеристики - на уровне объемных. Квантовая эффективность в максимуме спектральной чувствительности составляет 56 %.
- Дефектность эпитаксиального МФПУ не хуже объемных.

Концентрация доноров в подложке высокоэффективных МФПУ может быть меньше 10^{18} см^{-3} при условии утоньшении подложек до 10—15 мкм.

Для уменьшения дефектности и темновых токов, повышения однородности характеристик МФПУ необходимо:

- осуществлять формирование p – n -переходов в процессе роста;
- совершенствовать технологию подготовки подложки перед эпитаксией и пассивацию поверхности мезаструктур.

Для полного устранения взаимосвязи между элементами, обусловленной боковой диффузией неосновных носителей заряда, необходимо полное разделение элементов эпитаксиальных структур до подложки.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-2787.2014.9

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A. Progress in Quantum Electronics. 2012.

Vol. 36. P. 342.
 2. www.scd.co.il; SCD Semiconductor Devices. Israel
 3. www.sbfpc.com; Lockheed Martin Corporation Santa Barbara Focalplane. USA
 4. Weiguo Sun, Huitao Fan, Zhenyu Peng, Liang Zhang, Xiaolei Zhang, Lei Zhang, Zhengxiong Lu, Junjie Si, E. Emelyanov, M. Putyato, B. Semyagin, O. Pchelyakov, V. Preobrazhenskii // Infrared Physics & Technology 62, 143–146 (2014).
 5. Колмов О. С., Семенов А. Н., Фирсов Д. Д., Мельцер Б. Я., Соловьев А. А., Попова Т. В., Пухтин А. Н., Иванов С. В. // ФТП, 45, 1481 (2011).
 6. Michel E., Singh G., Slivken S., Besikci C., Bove P., Ferguson I., and Razeghi M. // Applied Physics Letters 65, 3338 (1994).
 7. Яковлева Н. И., Болтарь К. О. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 45.
 8. Stafeev V. I., Mansvetov N. G., Iakovleva N. I., Boltar K. O. // Proceedings SPIE. 1998. Vol. 3819. P. 32.
 9. Болтарь К. О., Мансветов Н. Г., Стафеев В. И., Яковлева Н. И. // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 2. С. 77.
 10. Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А., Пономаренко В. П., Ранцан С. К., Фадеев В. В. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 67.
 11. www.orion-ir.ru; АО «НПО «Орион». Россия
 12. Болтарь К. О., Киселева Л. В., Лопухин А. А., Савостин А. В. Патент РФ № 2460174. 2012.
 13. Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А., Полуноев В. В., Рябова А. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 6. С. 733.
 14. Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А., Мансветов Н. Г. // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 67.

FPA 320×256 InSb detectors with an epitaxial layer fabricated on the high doping substrate

*I. D. Burlakov^{1,2}, K. O. Boltar^{1,3}, P. V. Vlasov¹, A. A. Lopukhin¹
 A. I. Toropov⁴, K. S. Juravlev⁴, and V. V. Fadeev⁵*

¹ Orion R&P Association, Inc.

9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
 E-mail: orion@orion-ir.ru

² Moscow Technological University (MIREA)
 78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology
 9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

⁴ Rzhanov Institute of Physics of Semiconductors, SB RAS
 13 Acad, Lavrent'ev av., Novosibirsk, 630090, Russia
 E-mail: ifp@isp.nsc.ru

⁵ STC VDM-TECHNOLOGY
 9 Karmanitsky al., Moscow, 121002, Russia

Received June 02, 2016

Features of the FPA 320×256 InSb detectors created in an epitaxial layer on the high doping substrate have been investigated. The average noise equivalent temperature difference at the integration time of 1.46 ms is 10.5 мК, the number of defects is 0.12 % for FPA 320×256 with a cold shield 1:0.94 aper-

ture. Comparison of an epitaxial FPA with a similar serial FPA on the basis of the bulk InSb has been discussed.

PACS: 07.07.Df, 07.57.-c, 81.05.Ea, 81.65.Rv

Keywords: Focal Plane Array, indium antimonide photodiodes, epitaxial layer.

REFERENCES

1. A. Rogalski, Progress in Quantum Electronics 36, 342 (2012).
2. www.scd.co.il; (SCD Semiconductor Devices. Israel)
3. www.sbfip.com; (Lockheed Martin Corporation, Santa Barbara Focalplane. USA)
4. Weiguo Sun, Huitao Fan, Zhenyu Peng, Liang Zhang, Xiaolei Zhang, Lei Zhang, Zhengxiong Lu, Junjie Si, E. Emelyanov, M. Putyato, B. Semyagin, O. Pchelyakov and V. Preobrazhenskii, Infrared Physics & Technology **62**, 143 (2014).
5. O. S. Komkov, A. N. Semenov, D. D. Firsov, B. Ya. Merltser, A. A. Solov'ev, T. V. Popova, A. N. Pikhin, S. V. Ivanov, Semiconductors **45**, 1481 (2011).
6. E. Michel, G. Singh, S. Slivken, C. Besikci, P. Bove, I. Ferguson and M. Razeghi, Applied Physics Letters **65**, 3338 (1994).
7. N. I. Iakovleva, K. O. Boltar, Prikladnaya Fizika, No. 2, 45 (1999).
8. V. I. Stafeev, N. G. Mansvetov, N. I. Iakovleva, and K. O. Boltar, Proc. SPIE **3819**, 32 (1998).
9. K. O. Boltar, N. G. Mansvetov, V. I. Stafeev, N. I. Iakovleva, Opticheskii Zhurnal, **67** (2), 77 (2000).
10. K. O. Boltar, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, V. P. Ponomarenko, S. K. Rantsan, and V. V. Fadeev, Prikladnaya Fizika, No. 6, 67 (2013).
11. www.orion-ir.ru; (Orion R&P Association. Russia)
12. K. O. Boltar, L. V. Kiseleva, A. A. Lopukhin, and A. V. Savostin, RF Patent, No. 2460174 (2012).
13. K. O. Boltar, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, V. V. Poluneev, and A. A. Ryabova, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **1**, 733 (2013).
14. K. O. Boltar, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, and N. G. Mansvetov, Prikladnaya Fizika, No. 3, 67 (2014).