

Зависимость пространственного разрешения матричного фотоприемного устройства на основе антимонида индия от толщины фоточувствительного слоя

К. О. Болтарь, П. В. Власов, П. С. Лазарев, А. А. Лопухин, В. Ф. Чишко

Исследована фотоэлектрическая взаимосвязь матричных фотоприемных устройств средневолнового ИК-диапазона форматов 320×256 элементов с шагом 30 мкм и 640×512 элементов с шагом 15 мкм на основе антимонида индия. Определена зависимость величины взаимосвязи от толщины объемной структуры утоньшенного антимонида индия. Взаимосвязь элементов МФПУ на основе эпитаксиального антимонида индия существенно меньше, чем взаимосвязь на основе объемного антимонида индия.

Ключевые слова: МФПУ, антимонид индия, пространственное разрешение, утоньшение, диффузия, фотоэлектрическая взаимосвязь

Ссылка: Болтарь К. О., Власов П. В., Лазарев П. С., Лопухин А. А., Чишко В. Ф. // Прикладная физика. 2020. № 1. С. 18.

Reference: K. O. Boltar, P. V. Vlasov, P. S. Lazarev, A. A. Lopukhin, and V. F. Chishko, Applied Physics, No. 1, 18 (2020).

Введение

Матрицы фотодиодов из антимонида индия InSb отличаются высокой однородностью свойств по площади, меньшим количеством дефектных элементов и более низкой ценой по сравнению с аналогичными устрой-

ствами на основе твердых растворов кадмий-ртуть-теллур. Вследствие этого большое количество матричных фотоприемных устройств (МФПУ) средневолнового ИК-диапазона изготавливаются на основе фотодиодов из InSb [1–6].

В АО «НПО «Орион» разработаны и выпускаются серийно МФПУ на основе объемного InSb форматов 320×256 элементов с шагом 30 мкм и 640×512 элементов с шагом 15 мкм с охладителем типа интегральный Стирлинг, блоком сопряжения и блоком электронной обработки [7–9].

Целью данной работы являлось исследование фотоэлектрической взаимосвязи МФПУ средневолнового ИК-диапазона форматов 320×256 элементов с шагом 30 мкм и 640×512 элементов с шагом 15 мкм на основе антимонида индия, которая влияет на пространственное разрешение фотоприемных устройств, в состав которых входит МФПУ.

Постановка работы

Для изготовления активного элемента МФПУ (матрицы фотодиодов из InSb) использовалась меза-технология с глубиной разделе-

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

Власов Павел Валентинович¹, вед. инженер.

Лазарев Павел Сергеевич¹, нач. НТЦ-1.

Лопухин Алексей Алексеевич¹, нач. участка, к.т.н.

Чишко Владимир Федорович³, с.н.с., д.ф.-м.н.

¹ АО «НПО «Орион».

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

Тел.: 8(499) 374-94-00, 374-94-01.

E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер. 9.

³ АО Московский завод «Сапфир».

Россия, 117545, Москва, Днепропетровский проезд, 4А,

стр. 3А.

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2019 г.

© Болтарь К. О., Власов П. В., Лазарев П. С., Лопухин А. А., Чишко В. Ф., 2020

ния элементов ~ 1 мкм. Матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) гибридизировались индиевыми микроконтактами с БИС считывания форматов 320×256 и 640×512 элементов и утоньшались до толщины 20÷8 мкм. Толщина фоточувствительного слоя эпитаксиальной структуры (epi), выращенной на высоколегированной подложке, составляет 5 мкм. Для улучшения операции утоньшения в связи с уменьшением шага крупноформатных МФПУ разработан метод утоньшения, позволяющий прецизионно контролировать толщину фоточувствительного (ФЧ) слоя и однородность толщины по площади МФЧЭ [10].

Утоньшение одновременно влияет на ряд характеристик МФПУ на основе InSb:

- утоньшение необходимо для увеличения квантового выхода вследствие ограниченной диффузионной длины неосновных носителей заряда (~ 50 мкм);

- утоньшение уменьшает фотоэлектрическую взаимосвязь, обусловленную боковой диффузией неосновных носителей заряда;

- утоньшение увеличивает надежность гибридизации за счет компенсации напряжений, связанных с различием температурных коэффициентов линейного расширения InSb и Si посредством растяжения утоньшенной структуры антимионида индия.

Однако утоньшение до толщины менее 8 мкм приводит к уменьшению квантового выхода, а также может приводить к образованию трещин по периметру структуры при термоциклировании. Таким образом, возникает задача оптимизации толщины ФЧ слоя, ко-

торая решается компромиссом между величинами квантового выхода и взаимосвязи, обусловленной боковой диффузией неосновных носителей заряда в объеме InSb [11–16].

Данные по объемной диффузионной длине для *n*-InSb, применяемого в МФПУ (см. табл. 1), существенно отличаются по результатам исследований различных авторов.

Задача определения фотоэлектрической взаимосвязи усложняется тем, что в состав модуля формирования тепловизионного видеосигнала (МФТВ) на основе матрицы фотодиодов из антимионида индия входят следующие элементы: 1) – матричный фотоприемный модуль (МФПМ), включающий матричное фотоприемное устройство с охлаждаемой диафрагмой с относительным отверстием 1:4, где на значительной высоте от плоскости ФЧЭ крепится фильтр, оптимизированный относительно окна прозрачности атмосферы, вакуумный корпус снабженный просветленным входным окном, микрокриогенную систему охлаждения (МКС) типа интегральный Стирлинг, 2) – электронный блок сопряжения, 3) – блок электронной обработки (БЭО), что в совокупности дополнительно влияет на пространственное разрешение. Кроме этого, выявление связи технологического параметра – толщины ФЧ слоя – с пространственным разрешением усложнено невозможностью целенаправленного варьирования параметров в серийных приборах. Поэтому для построения зависимостей были использованы флуктуации толщины ФЧ слоя в серийных изделиях, обусловленные случайными выбросами при изготовлении МФПУ.

Таблица 1

Данные по объемной диффузионной длине для *n*-InSb

Источник	Объемная диффузионная длина дырок в <i>n</i> -InSb, мкм
1. Bloom I. and Nemirovsky Y. 1992 [17]	31–36
2. Davis M., Greiner M., Sanders J., Wimmers J. 1998 [18]	7–10
3. Boliang C., Zhang Yueqing et al. 2001 [19]	32–38
4. Itay Shtrichman, Tal Fishman et al. 2007 [20]	44–50
5. Лопухин А. А., Степанюк В. Е. и др. 2014 [21]	46–73

Измерение фотоэлектрической взаимосвязи с помощью точечной засветки и миры

Для МФПУ формата 320×256 с шагом 30 мкм на основе антимионида индия с помо-

щью точечной засветки измерения фотоэлектрической взаимосвязи производились по стандартному методу 1.17 ГОСТ 17772-88 [22] (см. рис. 1).

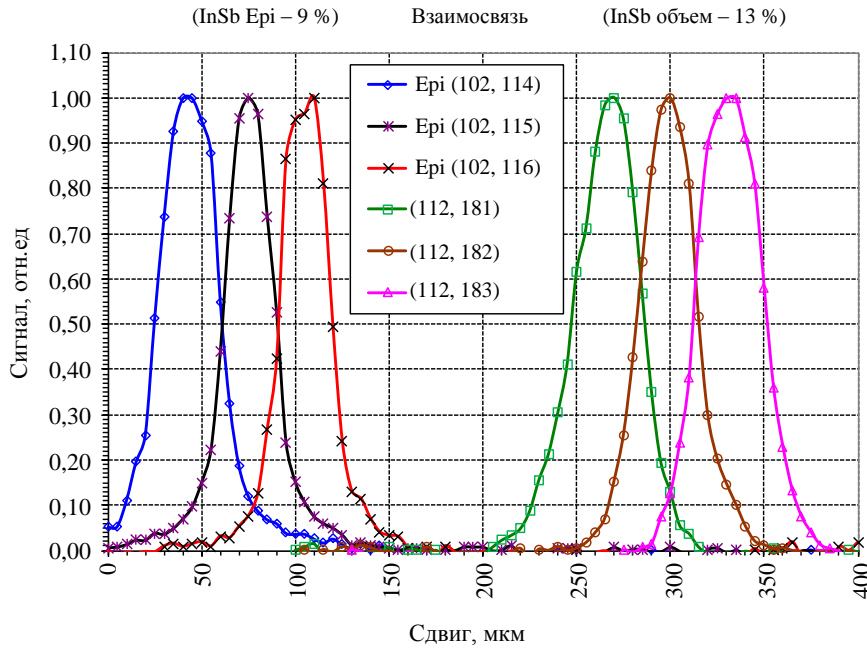


Рис. 1. Зависимости выходного сигнала МФПУ формата 320×256 с шагом 30 мкм на основе эпитаксиального (слева) и объемного (справа) InSb для трех соседних пикселей в строке от сдвига пятна засветки вдоль строки МФПУ.

Величина фотоэлектрической взаимосвязи определялась как отношение сигнала соседнего пикселя к сигналу пикселя, на котором сконцентрировано точечное ИК-излучение. В эпитаксиальном МФПУ (толщина ФЧ-слоя 5 мкм) взаимосвязь составила – 9 %, в объемном (толщина ФЧ слоя 10 мкм) – 13 % (см. рис. 1).

Во втором случае была измерена минимально разрешимая разность температур (МРРТ) на четырехштриховых мирах разной частоты. МРРТ определялась по полусумме

медианных значений минимальной температуры АЧТ по группе из 5 экспертов при положительном и отрицательном контрасте изображения мира, при которой каждый эксперт определял температурную границу видимости четырех штрихов мира.

МРРТ мира 14 штрихов/мм составила 100 мК для эпитаксиального и 240 мК для объемного МФПУ (см. рис. 2).

Для обоих методов использовался объектив с апертурой 1:2,5 и фокусным расстоянием 62 мм.

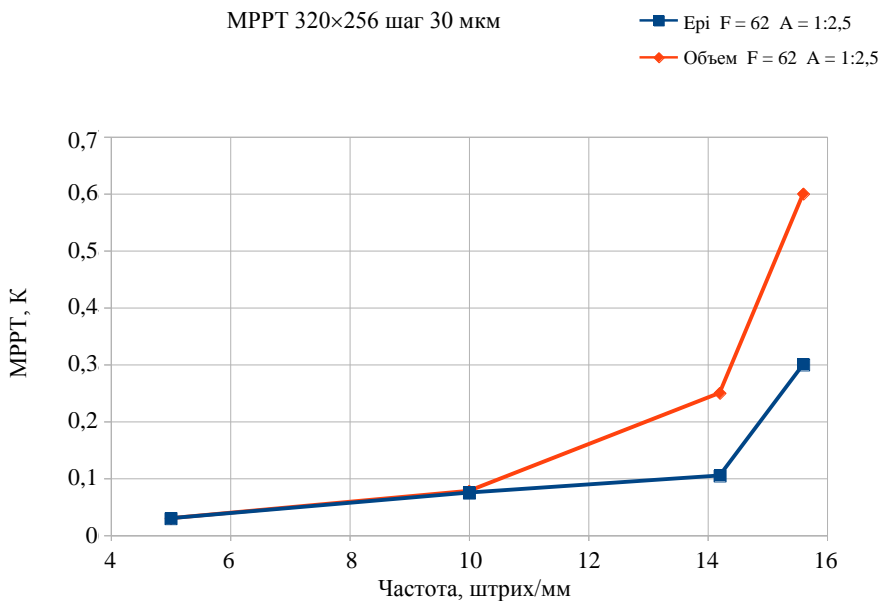


Рис. 2. Зависимости минимально разрешимой разности температур МФПУ формата 320×256 с шагом 30 мкм на основе эпитаксиального (квадрат) и объемного (ромб) InSb от частоты мира.

Различие в пространственном разрешении по методу МРРТ весьма значительно при максимальных пространственных частотах, близких к частоте Найквиста 16,7 штрихов/мм при сравнительно небольшой разнице (13 % и 9 %) результатов для метода точечной засветки. Из сравнения графиков на рис. 1 и 2 следует, что метод МРРТ более информативен при максимальной пространственной частоте. Однако этот метод достаточно субъективен.

Оценка пространственного разрешения по глубине модуляции яркости

Нами предложен метод оценки пространственного разрешения для более объективной количественной оценки пространственного разрешения по сравнению с оценкой видимости миры группой экспертов.

На рис. 3 показана осциллограмма, иллюстрирующая метод оценки пространственного разрешения по модуляции яркости выходного сигнала МФТВ равной по величине $\Delta U/U$.

люстрирующая схему метода оценки пространственного разрешения по глубине модуляции яркости выходного сигнала МФТВ.

В табл. 2 и на рис. 4, а и б приведены результаты измеренных зависимостей модуляции яркости выходного сигнала МФТВ от толщины МФЧЭ на пространственных частотах миры 3,5 мрад⁻¹ и 5,5 мрад⁻¹ тепловизионного изображения с объективом $F = 200$ мм и относительным отверстием 1:4. В табл. 2 представлены результаты как прямого изображения, так и с электронным масштабированием, уменьшающим влияние разрешения дисплея.

Фотоэлектрические характеристики матричных фотоприемников были измерены при температуре 80 К.

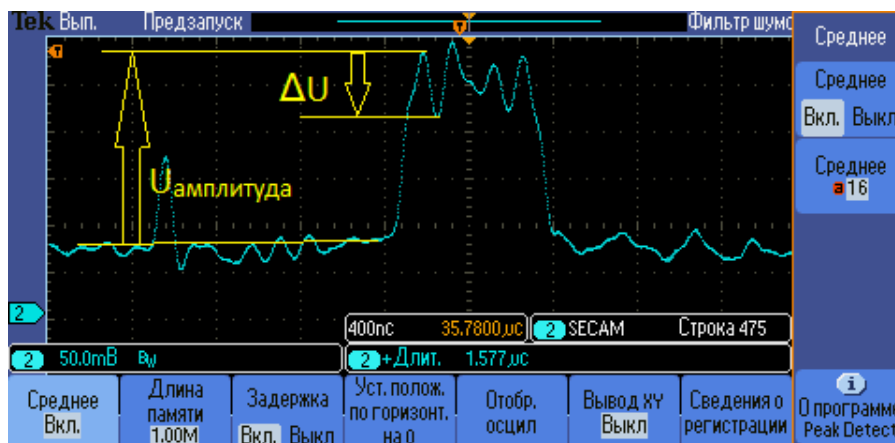


Рис. 3. Осциллограмма, иллюстрирующая метод оценки пространственного разрешения по модуляции яркости выходного сигнала МФТВ равной по величине $\Delta U/U$.

Таблица 2

Результаты измеренных зависимостей модуляции яркости выходного сигнала МФТВ $\Delta U/U$ от толщины МФЧЭ

Номер образца	d , мкм	3,5 мрад ⁻¹ без масштабирования	3,5 мрад ⁻¹ масштаб	5,5 мрад ⁻¹ без масштабирования	5,5 мрад ⁻¹ масштаб
П15-369	5	0,68	0,72	0,51	0,44
П15-411	10	0,69	0,64	0,37	0,37
П15-382	11	0,56	0,70	0,29	0,30
П15-391	15	0,48	0,45	0,12	0,14
П15-357	15	0,44	0,56	0,10	0,15
П15-279	20	0,19	0,20	0,00	0,03

Примечание: d – толщина ФЧ-слоя.

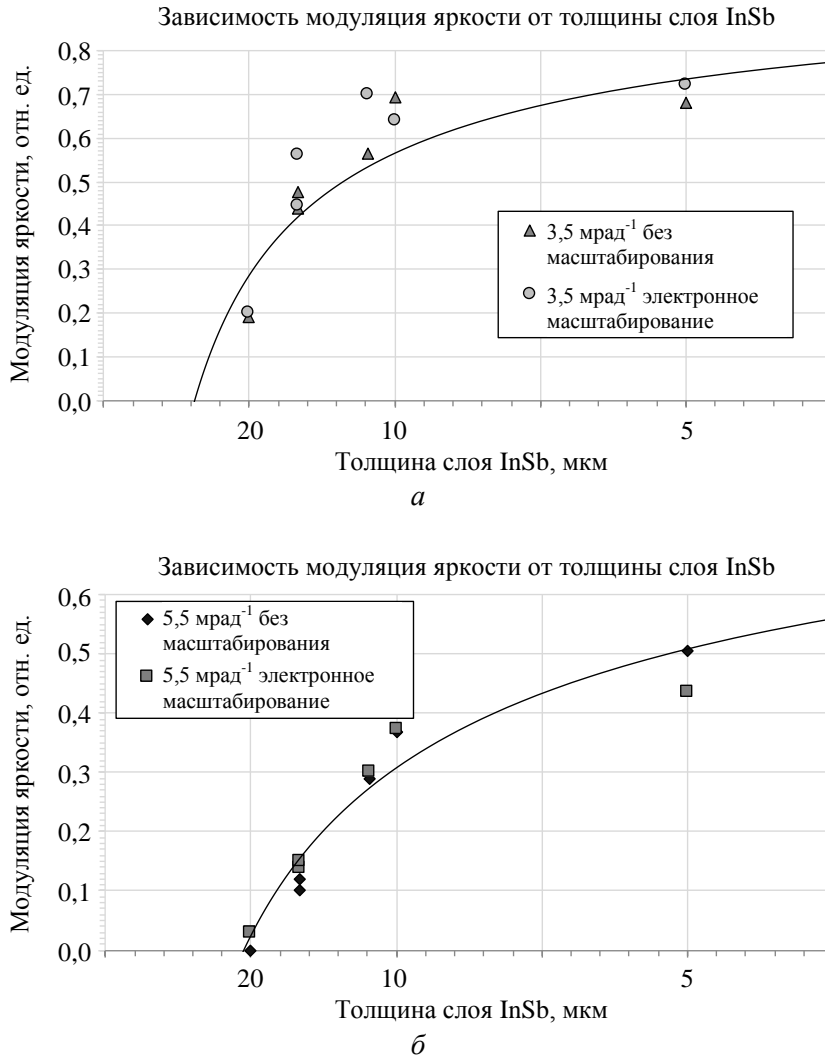


Рис. 4. Зависимости глубины модуляции яркости выходного сигнала МФТВ от толщины МФЧЭ без и с электронным масштабированием тепловизионного изображения: а) – на пространственной частоте мери 3,5 мрад⁻¹; б) – на пространственной частоте мери 5,5 мрад⁻¹.

Глубина модуляции максимальна для эпитаксиальной структуры с толщиной эпитаксиального слоя $d = 5$ мкм. Для объемных структур глубина модуляции уменьшается с увеличением толщины структуры. Это показывает преимущество эпитаксиальных структур по сравнению с объемными структурами антимонида индия по пространственному разрешению, что обусловлено увеличением взаимосвязи между элементами из-за боковой диффузии неосновных носителей заряда. Взаимосвязь резко увеличивается при толщине структуры более 13–15 мкм для шага ФЧЭ 30 мкм и более 8–10 мкм для шага ФЧЭ 15 мкм.

Глубина модуляции не возрастает до единицы даже для тонких эпитаксиальных слоев. Для полного устранения взаимосвязи между элементами, обусловленной боковой диффузией неосновных носителей заряда, не-

обходимо полное разделение элементов, то есть разделение ФЧ-слоя мезаструктуры на всю глубину фоточувствительного слоя.

Выводы

Исследовано пространственное разрешение МФПУ форматов 320×256 с шагом 30 мкм и 640×512 с шагом 15 мкм как утоньшенных объемных ФЧ-слоев, так и эпитаксиальных слоев антимонида индия, полученных молекулярно-лучевой эпитаксией. Экспериментально подтверждены преимущества эпитаксиальных структур по сравнению с объемными структурами антимонида индия по пространственному разрешению.

Установлено, что для реализации близкого к максимально возможному пространственному разрешению МФПУ толщина объемных структур для МФПУ с шагом 30 мкм

должна быть не более 13–15 мкм, а для МФПУ с шагом 15 мкм не более 8–10 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A., Kopytko M., Martyniuk P. Antimonide-based Infrared Detectors: A New Perspective. 2018.
2. www.scd.co.il SCD Semiconductor Devices (Израиль).
3. www.sbfpr.com Lockheed Martin Corporation Santa Barbara Focalplane (США).
4. www.cinele.com/products/infrared_large_format.htm L-3 Cincinnati Electronics (США).
5. www.i3system.com i3system, Inc. (Республика Корея).
6. http://orion-ir.ru/ АО «НПО «Орион» ГНЦ РФ (Россия).
7. Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А., Полунеев В. В., Рябова А. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 6. С. 733.
8. Соляков В. Н., Корнеева М. Д., Кортиков М. В., Катаев О. В., Трунов Г. Л., Соломахин П. А. // Прикладная физика. 2011. № 4. С. 96.
9. Балиев Д. Л., Болтарь К. О., Киселева Л. В., Ложников В. Е., Лопухин А. А., Мансветов Н. Г., Полунеев В. В., Рудневский В. С., Савостин А. В. // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 41.
10. Болтарь К. О., Киселева Л. В., Лопухин А. А., Савостин А. В. Патент № 2460174, 2012.
11. Bloom Ian, Nemirovsky Yael. // IEEE Transactions On Electron Devices. 1991. Vol. 38. No. 8. P. 1792.
12. Guo Nan et al. Effects of Crosstalk on Photoresponse for Mid-wavelength InSb Infrared Focal Plane Arrays, 2010.
13. Holloway H. // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60. No. 3. P. 1091.
14. Яковлева Н. И., Болтарь К. О. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 45.
15. Stafeev V. I., Mansvetov N. G., Iakovleva N. I., Boltar K. O. // Proceedings SPIE. 1998. Vol. 3819. P. 32.
16. Болтарь К. О., Мансветов Н. Г., Стафеев В. И., Яковлева Н. И. // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 2. С. 77.
17. Bloom I., Nemirovsky Y. // IEEE Trans. Electron Devices. 1992. Vol. 39. No. 4. P. 809.
18. Davis M., Greiner M., Sanders J., Wimmers J. // Proceedings of SPIE. 1998. Vol. 3379. P. 288.
19. Boliang C. et al. // Proceedings of SPIE. 2001. Vol. 4369. P. 436.
20. Shtrichman Itay et al. // Proceedings of SPIE. 2007. Vol. 6542. P. 288.
21. Лопухин А. А., Степанюк В. Е. и др. // Прикладная физика. 2014. № 6. С. 56.
22. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. 1.17 Метод определения фотоэлектрической связи многоэлементного ФЭПП (ФПУ). – М.: Издательство стандартов, 1988.

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

Crosstalk dependence of a photosensitive layer thickness in InSb FPA

K. O. Boltar^{1,2}, P. V. Vlasov¹, P. S. Lazarev¹, A. A. Lopukhin¹,
and V. F. Chishko³

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

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

³ JSC "MZ "Sapphir"
Bld. 3A, 4A Dneprohetrovskiy passage, Moscow, 117545, Russia

Received December 20, 2019

We investigated photoelectric crosstalk in 320×256 with pitch 30mkm and 640×512 with pitch 15mkm mid-wave IR range InSb FPA. The dependence of crosstalk value from the thickness of the InSb bulk structure has been determined. The crosstalk of epitaxial FPA elements is substantially less than that of bulk FPA elements.

Keywords: Focal Plane Array, FPA, indium antimonide, photosensitive, thinning, diffusion, crosstalk.

REFERENCES

1. A. Rogalski, M. Kopytko, and P. Martyniuk, *Antimonide-based Infrared Detectors: A New Perspective*. (2018).
2. www.scd.co.il SCD Semiconductor Devices (Israel).
3. www.sbf.com Lockheed Martin Corporation Santa Barbara Focalplane (USA).
4. www.cinele.com/products/infrared_large_format.htm L-3 Cincinnati Electronics (USA).
5. www.i3system.com i3system, Inc. (Republic of Korea).
6. <http://orion-ir.ru/> Orion R&P Association, JSC. (Russia).
7. K. O. Boltar, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, V. V. Poluneev, and A. A. Ryabova, *Usp. Prikl. Fiz.* **1** (6), 733 (2013).
8. V. N. Solyakov, M. D. Korneeva, and M. V. Kortikov, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 96 (2011).
9. D. L. Baliev, K. O. Boltar., P. V. Vlasov, L. V. Kiseleva , V. E. Lozhnikov, A. A. Lopukhin, N. G. Mansvetov, V. V. Poluneev, V. S. Rudnevsky, and A. V. Savostin, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 41 (2014).
10. K. O. Boltar, L. V. Kiseleva, A. A. Lopukhin, and A. V. Savostin, RF Patent No. 2460174. (2012).
11. Ilan Bloom and Yael Nemirovsky, *IEEE Transactions On Electron Devices* **38** (8), 1792 (1991).
12. Nan Guo, et al., *Effects of Crosstalk on Photoresponse for Mid-wavelength InSb Infrared Focal Plane Arrays*, (2010).
13. H. Holloway, *J. Appl. Phys.* **60** (3), 1091 (1986).
14. N. I. Iakovleva and K. O. Boltar, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 45 (1999).
15. V. I. Stafeev, N. G. Mansvetov, N. I. Iakovleva, and K. O. Boltar, *Proceedings SPIE* **3819**, 32 (1998).
16. K. O. Boltar, N. G. Mansvetov, V. I. Stafeev, and N. I. Iakovleva, *Optich. Zhurn.* **67** (2), 77 (2000).
17. I. Bloom and Y. Nemirovsky, *IEEE Trans. Electron Devices* **39** (4), 809 (1992).
18. M. Davis, M. Greiner, J. Sanders, and J. Wimmers, *Proceedings of SPIE* **3379**, 288 (1998).
19. C. Boliang et al., *Proceedings of SPIE* **4369**, 436 (2001).
20. Itay Shtrichman et al., *Proceedings of SPIE* **6542**, 288 (2007).
21. A. A. Lopukhin, V. E. Stepanyuk, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 6, 56 (2014).
22. GOST 17772-88. *Detectors of Irradiation* (Izdat. Standartov, Moscow, 1988) [in Russian].