

УДК 621.383.4/5:621.315.59

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

## Оптимизация толщины фоточувствительного слоя матричного фотоприемного устройства на основе антимонида индия

*А. А. Лопухин, К. О. Болтарь, П. В. Власов, В. В. Ерошенков,  
В. Ф. Чишко, Н. Ф. Кощавцев, Н. А. Ларионов*

*Оптимизирована толщина матричных фотоприемных устройств средневолнового диапазона формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм на основе антимонида индия. Измерены интегральные распределения толщины и разброса толщины по площади матричного фоточувствительного элемента. Определена оптимальная толщина из сравнения зависимостей интегральных распределений толщины объемной структуры утоньшенного антимонида индия с оценкой видимости миры в МФПУ.*

*Ключевые слова:* МФПУ, антимонид индия, пространственное разрешение, утоньшение, диффузионная длина, фотоэлектрическая взаимосвязь, оптимальная толщина.

**Ссылка:** Лопухин А. А., Болтарь К. О., Власов П. В., Ерошенков В. В., Чишко В. Ф., Кощавцев Н. Ф., Ларионов Н. А. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 5. С. 334.

**Reference:** A. A. Lopukhin, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, V. V. Eroshenkov, V. F. Chishko, N. F. Koschavtsev, and N. A. Larionov, Usp. Prikl. Fiz. **8** (5), 334 (2020).

### Введение

Матрицы фотодиодов на основе антимонида индия (InSb) выделяются высокой однородностью свойств по площади, меньшим количеством дефектных элементов и более низкой ценой. Поэтому большее количество матричных фотоприемных

устройств (МФПУ) средневолнового ИК-диапазона изготавливаются на основе фотодиодов из InSb [1–7].

В АО «НПО «Орион» разработаны и выпускаются серийно МФПУ на основе объемного InSb формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм с охладителем типа интегральный Стирлинг [8].

Лопухин Алексей Алексеевич<sup>1</sup>, нач. участка, к.т.н.

Болтарь Константин Олегович<sup>1,2</sup>, нач. НТК, д.ф.-м.н.

Власов Павел Валентинович<sup>1</sup>, вед. инженер.

Ерошенков Владимир Владимирович<sup>1</sup>, нач. участка.

Чишко Владимир Федорович<sup>2</sup>, с.н.с., д.ф.-м.н.

Кощавцев Николай Федорович<sup>1</sup>, гл. спец.

Ларионов Никита Александрович<sup>1</sup>, инженер.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

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

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. 9.

<sup>3</sup> АО «Московский завод «Сапфир».  
Россия, 117545, Москва, Днепропетровский проезд, 4А, стр. 3А.

Статья поступила в редакцию 04 сентября 2020 г.

© Лопухин А. А., Болтарь К. О., Власов П. В., Ерошенков В. В., Чишко В. Ф., Кощавцев Н. Ф., Ларионов Н. А., 2020

Для изготовления матрицы фотодиодов из InSb (МФЧЭ) использовалась меза-технология с глубиной разделения элементов  $\sim 1$  мкм. Матрицы фоточувствительных элементов гибридизировались индиевыми микроконтактами с БИС считывания формата  $640 \times 512$  элементов и утоньшались до толщины  $8 \div 16$  мкм. В связи с уменьшением шага крупноформатных МФПУ разработан метод утоньшения, позволяющий прецизионно контролировать толщину фоточувствительного слоя и однородность толщины по площади МФЧЭ [9, 19].

Утоньшение влияет на множество характеристик МФПУ на основе InSb. В частности, утоньшение необходимо для увеличения квантового выхода вследствие ограниченной диффузионной длины неосновных носителей заряда ( $\sim 50$  мкм), утоньшение уменьшает фотоэлектрическую взаимосвязь, обусловленную боковой диффузией неосновных носителей заряда, утоньшение увеличивает надежность гибридизации за счет компенсации напряжений, связанных с различием ТКР InSb и Si посредством растяжения утоньшенной структуры антимионида индия.

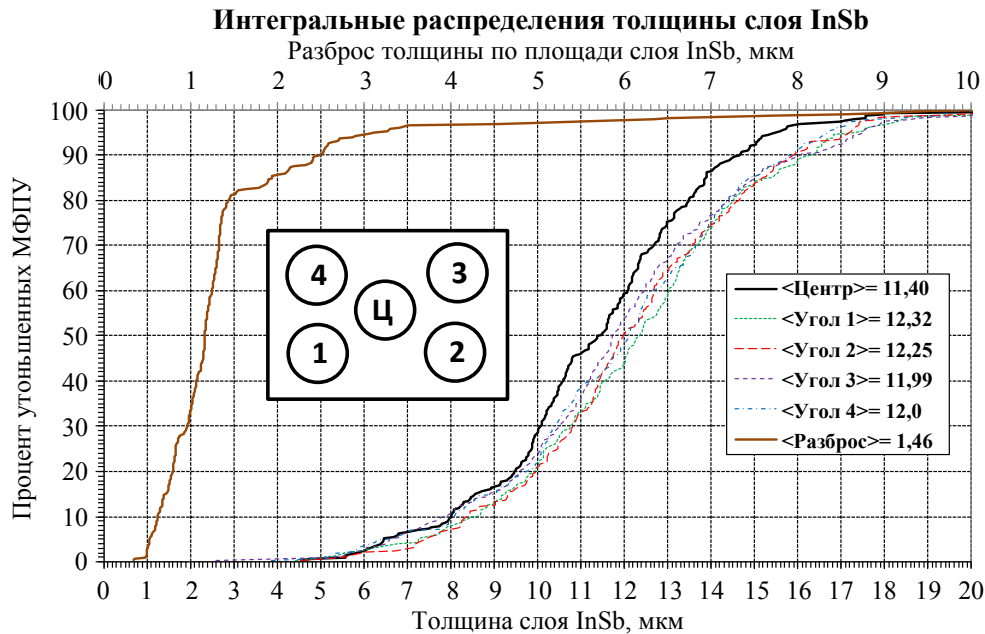
Однако утоньшение до толщины менее 8 мкм приводит к уменьшению квантового выхода, а также может приводить к образованию трещин по периметру структуры при термоциклировании. Таким образом, возникает задача оптимизации толщины фоточувствительного слоя, которая решается компромиссом между величинами квантового выхода, поверхностной рекомбинации и взаимосвязи, обусловленной боковой диффузией неосновных носителей заряда в объеме InSb [10–17].

Задача определения оптимальной толщины МФПУ усложняется тем, что в составе модуля формирования тепловизионного видеосигнала (МФТВ) на основе матрицы фотодиодов из антимионида индия входят: матричный фотоприемный модуль (МФПМ), включающий матричное фото-

приемное устройство с охлаждаемой диафрагмой с относительным отверстием 1:4, где на значительной высоте от плоскости ФЧЭ крепится фильтр, оптимизированный относительно окна прозрачности атмосферы, а вакуумный корпус снабжен просветленным входным окном, микрокриогенную систему охлаждения (МКС) типа интегральный Стирлинг, электронный блок сопряжения и блок электронной обработки (БЭО), что в совокупности дополнительно влияет на пространственное разрешение. Кроме этого, определение связи толщины фоточувствительного слоя с пространственным разрешением усложнено невозможностью целенаправленного изменения параметров в серийных приборах. Поэтому для построения зависимостей использован разброс толщины фоточувствительного слоя в серийных изделиях, обусловленный случайными процессами при изготовлении МФПУ.

#### **Оптимизация толщины ФЧ слоя по результатам измерения пространственного разрешения с помощью микры**

Для измерения толщины слоя InSb был использован бесконтактный способ с помощью Фурье-спектрометра из ИК-спектров отражения [18]. Излучение спектрометра ограничивалось диафрагмой диаметром 2 мм с целью измерения толщины в пяти точках по площади МФЧЭ (Ц – центр, 1, 2, 3, 4 – углы), как показано на вставке рис. 1. На этом же рисунке показаны результаты измерений в виде интегральных распределений толщины слоя InSb в центре и четырех углах, а также разброса толщины по площади МФЧЭ, изготовленных по обычному методу утоньшения. Разброс определялся как разность между максимальной и минимальной толщинами пластины, измеренными по пяти указанным на вставке рис. 1 областям.



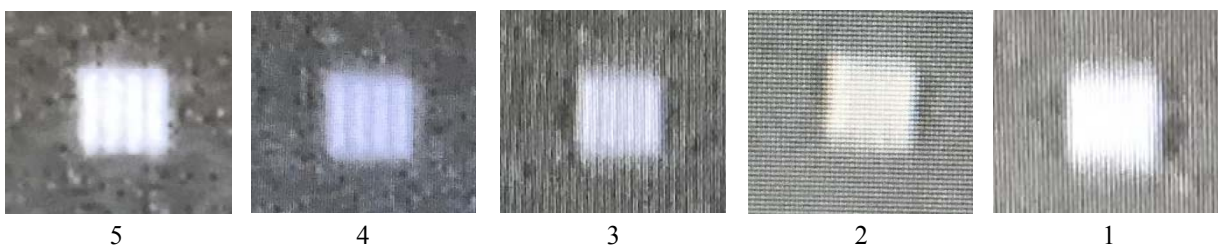
**Рис. 1.** Интегральные распределения толщины слоя InSb в центре и четырех углах, а также разброса толщины по площади МФЧЭ для МФПУ, изготовленных по обычному методу утоньшения.

Стоит отметить большой разброс по толщине МФПУ, достигающий восьми микрон в диапазоне от 8 до 16 мкм, а также величину разброса по площади МФЧЭ до 1,5 мкм по выборке 80 % МФПУ. Из интегральных распределений видно, что в центре МФЧЭ толщина фоточувствительного слоя существенно меньше, чем в углах, что обусловлено вогнутостью поверхности в результате изготовления МФЧЭ по обычному методу утоньшения.

Однако из интегральных распределений видно, что при толщинах менее 10 мкм вогнутость становится незначительной, что существенно уменьшает разброс

толщины по площади МФЧЭ.

Для оптимизации толщины ФЧ слоя InSb необходима количественная оценка видимости миры при измерении минимально разрешимой разности температур (МРРТ) на четырех штриховых мирах пространственной частоты  $5,5 \text{ мрад}^{-1}$ . Поэтому для повышения объективности, МРРТ определялась по полусумме значений экспертом при положительном и отрицательном контрасте изображения миры минимальной температуры АЧТ, при которой эксперт определял границу видимости четырех штрихов миры по пятибалльной шкале (см. рис. 2).



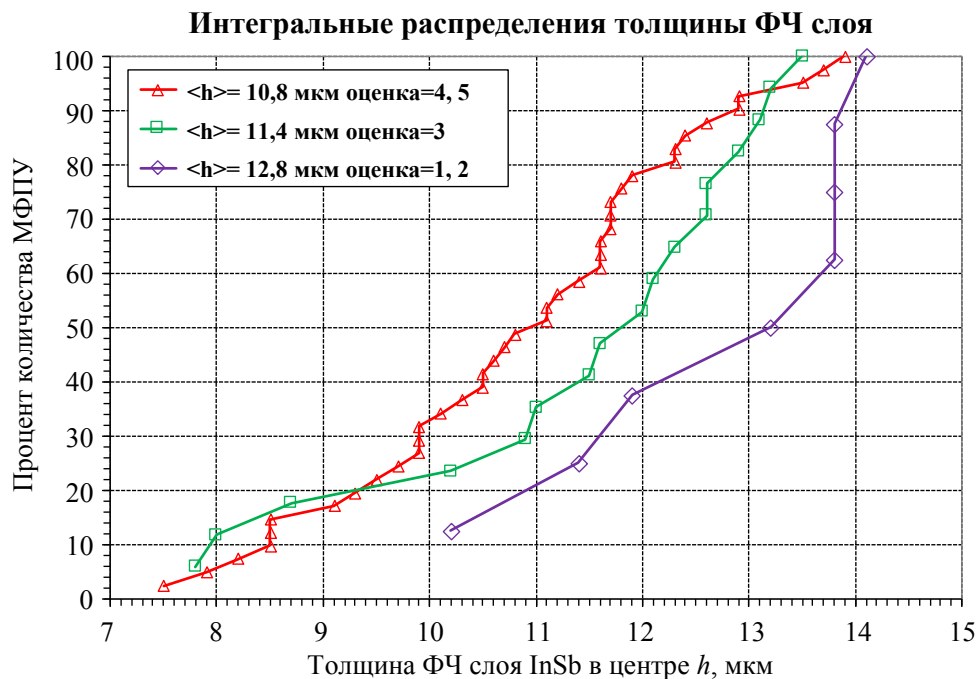
**Рис. 2.** Примеры тепловизионных изображений четырех штрихов миры на пространственной частоте  $5,5 \text{ мрад}^{-1}$  с объективом  $F = 200 \text{ мм}$  и относительным отверстием 1:4 с оценками ее видимости экспертом по пятибалльной шкале.

В таблице представлена зависимость от оценки видимости миры средней толщины утоньшенного антимида индия и количество МФПУ с данной оценкой для каждой оценки видимости миры (1+2, 3, 4+5) на пространственной частоте  $5,5 \text{ мрад}^{-1}$  тепловизионного изображения с объективом  $F = 200 \text{ мм}$  и относительным отверстием 1:4.

Таблица

Оценка видимости миры	Средняя толщина ФЧ слоя InSb, мкм	Количество МФПУ, шт.
1+2	12,8	8
3	11,4	17
4+5	10,8	41

Из таблицы следует монотонная зависимость улучшения оценки видимости штриховой миры с уменьшением средней толщины слоя антимида индия, что подтверждает основную роль в пространственном разрешении МФПУ на основе антимида индия влияния толщины ФЧЭ, которое, скорее всего, определяется боковой диффузией неосновных носителей заряда. Данные в таблице также показывают резкое увеличение средней толщины слоя антимида индия при оценке видимости миры от одного до двух по сравнению с оценками от трех до пяти, поэтому при построении интегральных распределений имеет смысл объединить данные для двух групп оценок: 1, 2 и 4, 5 (см. рис. 3).



**Рис. 3.** Зависимости интегральных распределений толщины утоньшенного антимида индия для различных оценок видимости миры (оценка 1 или 2 – ромб, оценка 3 – прямоугольник, оценка 4 или 5 – треугольник).

Из рис. 3 видно, что для оценок видимости миры 3, 4 и 5 распределение толщин не резкое, а примерно равномерное от 8 до 14 мкм. При больших ( $> 13 \text{ мкм}$ ) и малых ( $< 9 \text{ мкм}$ ) толщинах эти распределения пересекаются, что подтверждает сделанное во введении предположение о влиянии до-

полнительных факторов на пространственное разрешение. Одними из основных таких факторов является разброс по различным МФПУ значений поверхностной рекомбинации и длины диффузии.

При толщинах МФЧЭ менее 10 мкм оценки видимости миры не опускаются

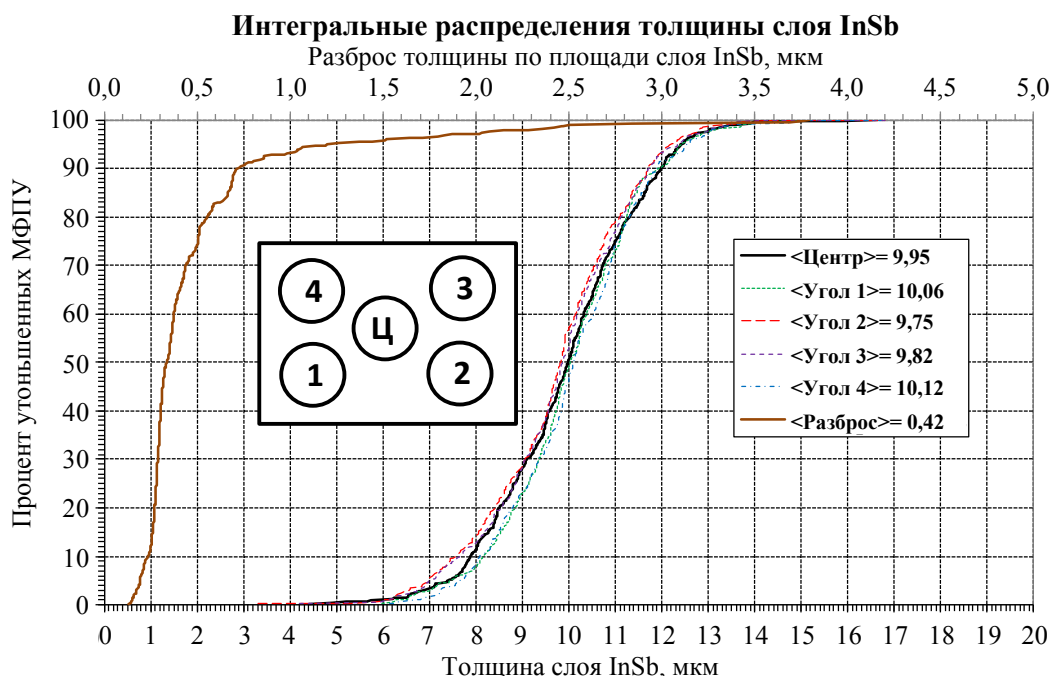
ниже оценки 3. С другой стороны, ограничением утоньшения менее 8 мкм является уменьшение квантового выхода, а также увеличение вероятности возникновения трещин монокристаллического антимонида индия при термоциклировании. Поэтому, с практической точки зрения, для обеспечения видимости миры в МФПУ необходимо утоньшать МФЧЭ до толщины, не превышающей 10 мкм. Таким образом оптимальная толщина МФЧЭ должна быть в диапазоне 8÷10 мкм.

По результатам зависимостей оценки видимости миры от толщины ФЧЭ был

доработан метод утоньшения с целью фиксации толщины в диапазоне 8÷10 мкм и уменьшения разброса по площади МФЧЭ.

На рис. 4 показаны результаты измерений в виде интегральных распределений толщины слоя InSb в центре и четырех углах, а также разброса толщины по площади МФЧЭ, изготовленных по улучшенному методу утоньшения.

В результате этих улучшений средняя толщина МФПУ фиксировалась в диапазоне от 8 до 12 мкм, а также уменьшился разброс по площади МФЧЭ до 0,5 мкм по выборке 80 % МФПУ (см. рис. 4).



**Рис. 4.** Интегральные распределения толщины слоя InSb в центре и четырех углах, а также разброса толщины по площади МФЧЭ для МФПУ, изготовленных по улучшенному методу утоньшения.

### Выводы

Проведена оптимизация толщины матричных фотоприемных устройств среднего волнового диапазона формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм на основе объемного антимонида индия.

Монотонность зависимости улучшения оценки видимости штриховой миры с уменьшением средней толщины слоя ан-

тимонида индия подтверждает основную роль в пространственном разрешении МФПУ на основе антимонида индия боковой диффузии неосновных носителей заряда.

Исходя из видимости миры, а также ограничений, связанных с уменьшением квантового выхода и увеличением вероятности возникновения трещин в монокристаллическом антимониде индия при тер-

моциклировании, оптимальная толщина МФЧЭ должна быть  $8 \div 10$  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.sbfpc.com Lockheed Martin Corporation Santa Barbara Focalplane (США).
4. www.cinele.com/products/infrared\_large\_for\_mat.htm L-3 Cincinnati Electronics (США).
5. www.i3system.com i3system, Inc. (Республика Корея).
6. Gau Y. T., Dai L. K., Yang S. P., Weng P. K., Huang K. S., Liu Y. N., Chiang C. D., Jih F. W., Cherng Y. T., Chang H. // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4078. P. 467. (Китай).
7. http://orion-ir.ru/ АО «НПО «Орион» ГНЦ РФ (Россия).
8. Башиев 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.
9. Болтарь К. О., Киселева Л. В., Лопухин А. А., Савостин А. В. Способ изготовления матричного фотоприемника (варианты) // Патент № 2460174. 2012.
10. Bloom Ilan, Nemirovsky Yael. // IEEE Transactions On Electron Devices. 1991. Vol. 38. № 8. P. 1792.
11. Guo Nan, Chao Meng, Jianzhen Pan, Weida Hu, Yanqiu Lv, Xiaoshuang Chen, Wei Lu / 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (Rome, 2010).
12. Davis M., Greiner M., Sanders J., Wimmers J. // Proceedings of SPIE. 1998. Vol. 3379. P. 288.
13. Itay Shtrichman et al. // Proceedings of SPIE. 2007. Vol. 6542. P. 288.
14. Holloway H. // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60. № 3. P. 1091.
15. Яковлева Н. И., Болтарь К. О. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 45.
16. Stafeev V. I., Mansvetov N. G., Iakovleva N. I., Boltar K. O. // Proceedings SPIE. 1998. Vol. 3819. P. 32.
17. Болтарь К. О., Мансветов Н. Г., Стафеев В. И., Яковлева Н. И. // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 2. С. 77.
18. Boliang C. et al. // Proceedings of SPIE. 2000. Vol. 4086. P. 155.
19. Власов П. В., Ерошенков В. В., Киселева Л. В., Кожаринова Е. А., Лопухин А. А., Савостин А. В., Умникова Е. В. Способ изготовления матричного фотоприемника // Патент № 2573714. 2014.

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

## Optimization of Photosensitive Layer Thickness in InSb FPA

A. A. Lopukhin<sup>1</sup>, K. O. Boltar<sup>1,2</sup>, P. V. Vlasov<sup>1</sup>, V. V. Eroshenkov<sup>1</sup>,  
V. F. Chishko<sup>3</sup>, N. F. Koschavtsev<sup>1</sup>, and N. A. Larionov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

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

<sup>3</sup> JSC "MZ "Sapphir"  
Bld. 3A, 4A Dneproretrovskiy passage, Moscow, 117545, Russia

Received September 04, 2020

**Photosensitive layer thickness in 640×512 mid-wave range InSb FPA with pitch 15 μm is optimized. The integral distributions of thickness and deviation of thickness**

***along the FPA area for previous and improved technology are measured. Optimal InSb bulk structure thickness in FPA from the estimation of visibility test pattern is determined.***

**Keywords:** Focal Plane Array, FPA, indium antimonide, photosensitive, thinning, diffusion length, crosstalk, optimal thickness.

#### REFERENCES

1. A. Rogalski, M. Kopytko, and P. Martyniuk, *Antimonide-based Infrared Detectors: A New Perspective*. (2018).
2. [www.scd.co.il](http://www.scd.co.il) SCD Semiconductor Devices (Israel).
3. [www.sbfpr.com](http://www.sbfpr.com) Lockheed Martin Corporation Santa Barbara Focalplane (USA).
4. [www.cinele.com/products/infrared\\_large\\_for\\_mat.htm](http://www.cinele.com/products/infrared_large_for_mat.htm) L-3 Cincinnati Electronics (USA).
5. [www.i3system.com](http://www.i3system.com) i3system, Inc. (Republic of Korea).
6. Y. T. Gau, L. K. Dai, S. P. Yang, P. K. Weng, K. S. Huang, Y. N. Liu, C. D. Chiang, F. W. Jih, Y. T. Cherng, and H. Chang, *Proc. SPIE* **4078**, 467 (2003) (China).
7. <http://orion-ir.ru/> Orion R&P Association, JSC. (Russia).
8. 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, *Applied Physics*, No. 2, 41 (2014).
9. K. O. Boltar, L. V. Kiseleva, A. A. Lopukhin, and A. V. Savostin, RF Patent No. 2460174 (2012).
10. Ilan Bloom and Yael Nemirovsky, *IEEE Transactions On Electron Devices* **38** (8), 1792 (1991).
11. Guo Nan, Chao Meng, Jianzhen Pan, Weida Hu, Yanqiu Lv, Xiaoshuang Chen, Wei Lu, in *Proc. 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* (Rome, 2010).
12. M. Davis, M. Greiner, J. Sanders, and J. Wimmers, *Proceedings of SPIE* **3379**, 288 (1998).
13. Itay Shtrichman et al., *Proceedings of SPIE* **6542**, 288 (2007).
14. H. Holloway, *J. Appl. Phys.* **60** (3), 1091 (1986).
15. N. I. Iakovleva and K. O. Boltar, *Applied Physics*, No. 2, 45 (1999).
16. V. I. Stafeev, N. G. Mansvetov, N. I. Iakovleva, and K. O. Boltar, *Proceedings SPIE* **3819**, 32 (1998).
17. K. O. Boltar, N. G. Mansvetov, V. I. Stafeev, and N. I. Iakovleva, *Optich. Zhurn.* **67** (2), 77 (2000).
18. C. Boliang et al., *Proceedings of SPIE* **4086**, 155 (2000).
19. P. V. Vlasov, V. V. Eroshenkov, L. V. Kiseleva, E. A. Kozharinova, A. A. Lopukhin, A. V. Savostin, and E. V. Umnikova, Patent RUS 2573714, 2014.