

УДК 621.383.4/5

## Исследование свойств фотоприемных устройств на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs, предназначенных для формирователей 3D-изображений

Н. И. Яковлева, К. О. Болтарь, М. В. Седнев, А. В. Никонов

*Проведены исследования матричных фотоприемных устройств формата 320×256 элементов на основе четырехслойных гетероструктур  $p^+ - B - n - N^+$ -типа с широкозонным барьерным слоем. Гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) с поглощающим узкозонным слоем InGaAs  $n$ -типа проводимости выращивались методами моэгидридной эпитаксии (МОСГЭ) на подложках InP. С помощью четырехкомпонентного тонкого слоя AlInGaAs  $n$ -типа с градиентным изменением ширины запрещенной зоны устранен разрыв между поглощающим ( $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ ) и барьерным ( $In_{0,52}Al_{0,48}As$ ) слоями. Использование дельта-легированных слоев в составе гетероструктуры позволило уменьшить барьер в валентной зоне и устранить немонотонность энергетических уровней. Проведены экспериментальные исследования темнового тока, среднее значение которого по матрицам фотодиодов с шагом 30 мкм не превышало 10 фА.*

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

*Ключевые слова:* InGaAs, InP, коротковолновый (SWIR) инфракрасный (ИК) спектральный диапазон, гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС), матрица фоточувствительных элементов (МФЧЭ), фотоприемное устройство (ФПУ), темновой ток, барьерный слой.

### Введение

В настоящее время в опто- и фотоэлектронике развивается ряд новых направлений, связанных с разработкой фотоприемных устройств (ФПУ), работающих в активно-импульсном режиме. Данные фотоприемные устройства построены на матрицах фоточувствительных элементов (МФЧЭ) со сверхнизкими значениями темнового тока, что не только существенно увеличивает обнаружительную способность детектирующей оптико-электронной системы по сравнению с обычными матрицами  $p-n$ - и  $p-i-n$ -фотодиодов [1—3], но и позволяет реализо-

вать усовершенствованные методы регистрации сверхслабых оптических сигналов и обработки 3D-изображений [4—6].

Нами разработано матричное фотоприемное устройство (ФПУ) коротковолнового ИК-диапазона формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм, предназначенное для активно-импульсных формирователей изображения. Данное ФПУ обеспечивает построение 2D- и 3D-изображений в реальном режиме времени с высоким пространственным разрешением и разрешением по дальности, а также возможность работы в режиме принятия детектирования сторонних лазерных импульсов.

Тройное соединение InGaAs крайне перспективно для ФПУ данного типа, поскольку его спектральная характеристика фоточувствительности хорошо коррелирует с используемыми в коротковолновом диапазоне длинами волн лазерного излучения: 1,06 и 1,55 мкм [1—5]. ФПУ проводит измерения дальности до произвольной точки исследуемого объекта, при этом сохраняется режим формирования обычного 2D-изображения. Данная разработка является в настоящее время весьма перспективной и находится на уровне лучших зарубежных аналогов фирм Sofradir, Raytheon и др. [3—5].

Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ<sup>1</sup>.  
Болтарь Константин Олегович, начальник НТК<sup>1</sup>, профессор<sup>2</sup>.  
Седнев Михаил Васильевич, начальник участка<sup>1</sup>.  
Никонов Антон Викторович, ведущий инженер НИЦ<sup>1</sup>,  
зам. зав. кафедрой<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

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

Тел. (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт.

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

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 12 августа 2016 г.

© Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В.,  
Никонов А. В., 2016

Инновационная составляющая разработки основана на включении в состав фотоприемного устройства матрицы фоточувствительных элементов на основе фотодиодов из InGaAs со сверхмалыми темновыми токами, а также использовании многофункциональной оригинальной БИС считывания и обработки фотосигналов [7].

Целью данной работы являлось создание и исследование матричных фотоприемных устройств формата 320×256 элементов на основе четырехслойных гетероструктур  $p^+-B-n-N^+$ -типа с широкозонным барьерным слоем и параметрами, не уступающими передовым разработкам оптоэлектронных систем для измерения дальности и построения 3D-изображений [8—10].

### Конструирование матрицы фоточувствительных элементов

Для достижения поставленной цели разработана и реализована четырехслойная архитектура  $p^+-B-n-N^+$ -типа на основе ГЭС InGaAs. Гетероструктура состоит из  $p-i-n$ -структуры, совмещенной с широкозонным барьерным слоем  $B$ , использование которого в области  $p-n$ -перехода позволяет эффективно подавлять генерационно-рекомбинационную и туннельные составляющие темнового тока.

Архитектура матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) на основе четырехслойной ге-

тероструктуры  $p^+-B-n-N^+$ -типа с разделением фоточувствительных элементов по мезатехнологии схематично представлена на рис. 1.



Рис. 1. Матрица фоточувствительных элементов на основе четырехслойной структуры  $p^+-B-n-N^+$ -типа из ГЭС InGaAs.

Конкретные параметры архитектуры матрицы фоточувствительных элементов на основе гетероструктуры  $p^+-B-n-N^+$ -типа приведены в табл. 1. Излучение падает со стороны оптически прозрачной подложки, что обеспечивает максимальное поглощение в высокоомном слое  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  для достижения максимальной квантовой эффективности при заданном времени считывания фотосигнала и высоких фотоэлектрических параметров ( $D^* \geq 10^{13} \text{ смВг}^{-1}\text{Гц}^{1/2}$ ).

Таблица 1

Тип слоя	Концентрация, $\text{см}^{-3}$	Толщина, мкм
5 — контактный слой InGaAs $p^+$ -типа	$1,6 \cdot 10^{18}$	0,1
4 — барьерный слой InAlAs, $P$ -типа слаболегированный	$(1-2) \cdot 10^{15}$	0,1
3 — поглощающий слой InGaAs $n$ -типа	$(1-2) \cdot 10^{16}$	2,0
2 — буферный слой InP $N^+$ -типа проводимости	$5 \cdot 10^{17}$	0,35
1 — оптически прозрачная подложка InP $n$ -типа	$2 \cdot 10^{18}$	350—400

Гетероэпитаксиальная структура  $p^+-B-n-N^+$ -типа, включает:

- высоколегированную оптически прозрачную подложку InP с концентрацией доноров  $N_D = (1-2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ;

- высоколегированный буферный слой InP  $N^+$ -типа проводимости толщиной  $\sim 0,3-1,0$  мкм, используемый для согласования кристаллической решетки подложки со слоем поглощения и изготовления контактов к  $N^+$ -области;

- активный поглощающий слой  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$   $n$ -типа проводимости толщиной  $2,0-2,5$  мкм с уровнем концентрации  $n = (1-2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и высоким значением подвижности носителей заряда (в пределах  $7800-9000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ) для электронов при температуре  $T = 300 \text{ К}$ ), обеспечивающий максимальное значение квантовой эффективности;

- широкозонный барьерный слой  $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$  ( $B$ )  $p$ -типа проводимости толщиной  $0,1-0,5$  мкм с концентрацией акцепторов  $p = (1-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , пассивирующий поглощающий слой  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  ( $E_g = 0,75 \text{ эВ}$ ) и уменьшающий токи поверхностной рекомбинации;

- контактный высоколегированный слой  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$   $p^+$ -типа толщиной  $0,1-0,5$  мкм для создания омического контакта к  $p$ -области.

На рис. 2, *a* схематично представлена область разрыва в зонной диаграмме между барьерным и поглощающим слоями  $p\text{-In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/n\text{-In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ . Согласно модели Андерсона [11], на гетерогранице различных по составу слоев расхождение энергии для зоны проводимости  $E_C$  и валентной зоны  $E_V$  описываются формулами:

$$\Delta E_C = \chi_1 - \chi_2$$

$$\Delta E_V = \Delta E_g - \Delta E_C$$

где  $E_g$  — ширина запрещенной зоны,  $E_F$  — положение уровня Ферми,  $\chi$  — энергия электронного сродства, которая определяется как энергия, необходимая для переноса электрона с состояния на краю зоны проводимости до энергетического уровня свободного электрона в вакууме.

На рис. 2, б показано примененное решение по устранению разрыва зонной диаграммы с помощью дополнительного четырехкомпонентного тонкого слоя AlInGaAs  $i$ -типа с градиентным изменением ширины запрещенной зоны для плавного перехода между кристаллическими структурами поглощающего ( $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ ) и барьерного ( $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ ) слоев.

Необходимость дальнейшего выравнивания барьера в валентной зоне (показано стрелочками на рис. 2, б) приводит к необходимости введения в структуру двух сильно легированных тонких дельта-слоев  $n$ - и  $p$ -типа проводимости на границе слоя

AlInGaAs с градиентным изменением ширины запрещенной зоны для устранения немонотонности энергетического уровня зонной структуры и беспрепятственного прохождения неосновных носителей заряда (дырок) к контакту при обратном напряжении смещения на структуре.

Подобные тонкие легированные слои можно математически описать с помощью дельта-функции Дирака, по названию которой данные слои получили обозначение дельта-легированных слоев. В идеале толщина дельта-слоев должна составлять один или несколько моноатомных слоев. На практике толщина данных слоев имеет конечное значение и составляет 5—10 нм. На рис. 3 схематично представлена зонная диаграмма рассматриваемого полупроводникового соединения при небольшом напряжении смещения с дельта-легированными слоями. Введение в структуру дополнительного поля за счет использования двух дельта-слоев  $n$ - и  $p$ -типа проводимости приводит к смещению и выравниванию энергии валентной зоны и зоны проводимости.

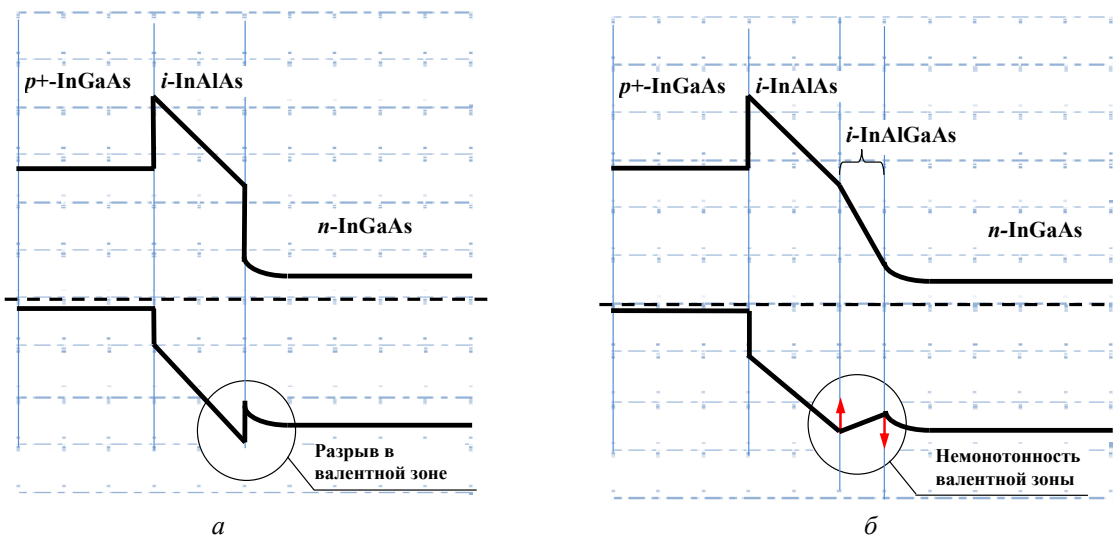


Рис. 2. Зонная диаграмма структуры при устранении разрыва между барьерным слоем и слоем поглощения: а — образование разрыва в валентной зоне; б — устранение разрыва между барьерным слоем и слоем поглощения.

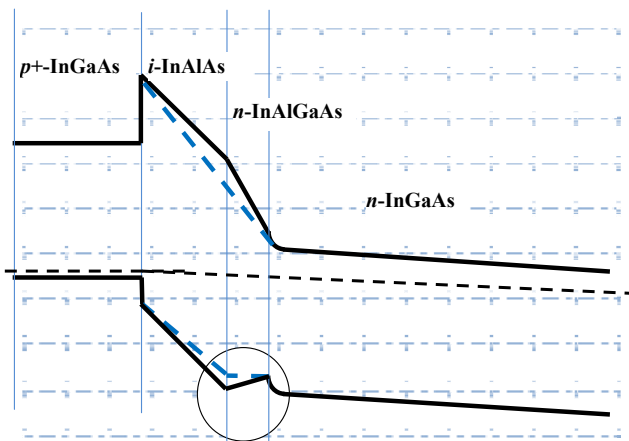


Рис. 3. ГЭС с двумя дельта-слоями при небольшом напряжении смещения.

Уменьшение наклона валентной зоны в градиентном слое можно оценить по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{eN_s \cdot d}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0},$$

откуда можно получить оценку концентрации дельта-слоя  $N_s$ , необходимой для выравнивания валентной зоны на потенциал, равный  $\Delta\varphi = 0,2$  эВ, а именно, имеем выражение (в системе единиц СИ):

$$N_s = \frac{\Delta\varphi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{e \cdot d} = \frac{0,2 \cdot 12,4 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{-8}} \text{ м}^{-2} = 2,7 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-2}.$$

Возможные параметры гетероструктуры на основе четырехслойной архитектуры (табл. 1) с тонким четырехкомпонентным слоем AlInGaAs переменного состава и тремя дельта-слоями, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер слоя	Состав слоя	Уровень легирования, см <sup>-3</sup>	Толщина слоя, мкм
9	дельта-слой $p^+-\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}:\text{Zn}$ сильнолегированный	$4 \times 10^{19}$	0,05
8	контактный слой $p^+-\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}:\text{Zn}$	$1,6 \times 10^{18}$	0,10
7	барьерный слой $\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$ $P$ -типа слаболегированный	$<1 \times 10^{15}$	0,10
6	дельта-слой $p\text{-Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$	$7 \times 10^{17}$	0,005
5	слой AlInGaAs $n$ -типа с градиентным изменением ширины запрещенной зоны	$<1 \times 10^{15}$	0,05
4	дельта-слой $n\text{-In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$	$7 \times 10^{17}$	0,005
3	поглощающий слой $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ $n$ -типа	$(1\text{--}2) \times 10^{16}$	2,0
2	буферный слой InP $N^+$ -типа	$5 \times 10^{17}$	0,35
1	оптически прозрачная подложка InP $n$ -типа (100) диаметр 50,8 мм	$2 \times 10^{18}$	350

Гетероструктуры на основе четырехслойной архитектуры  $p^+-B-n-N^+$ -типа с четырехкомпонентным слоем AlInGaAs  $i$ -типа с градиентным изменением ширины запрещенной зоны и тремя дельта-слоями выращивалась в НИИ «Полус» методом могиридной эпитаксии на согласованной с поглощающим слоем  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  по кристаллической структуре подложке InP  $n^+$ -типа проводимости. Для формирования матрицы фотодиодов формата  $320 \times 256$  элементов гетероструктура разделялась на мезаэлементы методом ионного и финишного жидкостного травления [12]. Шаг элементов в матрице составлял 30 мкм, размеры ФЧЭ —  $24 \times 24$  мкм. Глубина травления мезаструктуры задавалась временем и скоростью травления ионами аргона до широкозонного барьерного слоя  $\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$  через маску фоторезиста, что позволяло формировать отдельные ФЧЭ, пассивируя узкозонный поглощающий слой. Затем формировались контактные слои к фотодиодам и подложке.

### Экспериментальные исследования параметров ФПУ на основе гетероструктур InGaAs

Проведены исследования параметров ФПУ на основе четырехслойных ГЭС InGaAs с архитектурой  $n^+-B-n-P^+$ -типа с широкозонным барьерным слоем. На рис. 4 представлены диаграммы распределения темнового тока для двух ФПУ: №№ 135, 136. Контроль темновых токов фотодиодов показал достаточно высокое качество изготовленных ФПУ. Средние по МФЧЭ значения темнового тока при напряжениях обратного смещения  $V_{\text{фчэ}} = -0,35$  и  $V_{\text{фчэ}} = -0,37$  В составили  $I_{\text{т}} = 7,0$  фА и  $I_{\text{т}} = 8,5$  фА соответственно.

На рис. 5 представлены инфракрасные изображения в отраженном свете для ФПУ №№ 135, 136. Количество дефектных элементов в ФПУ составило  $N_{\text{def}} = 0,18$  % и  $N_{\text{def}} = 0,13$  % соответственно.

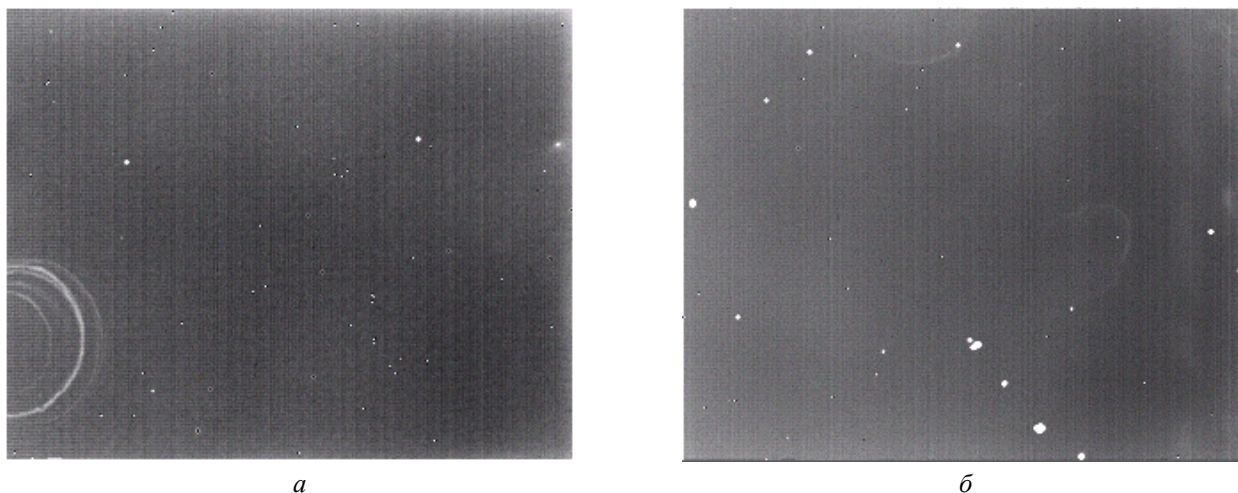


Рис. 4. Диаграммы распределения темнового тока: а — № 135,  $I_m = 7$  фА при  $V_{фчз} = -0,37$  В; б — № 136;  $I_m \sim 8,5$  фА при  $V_{фчз} = -0,35$  В.

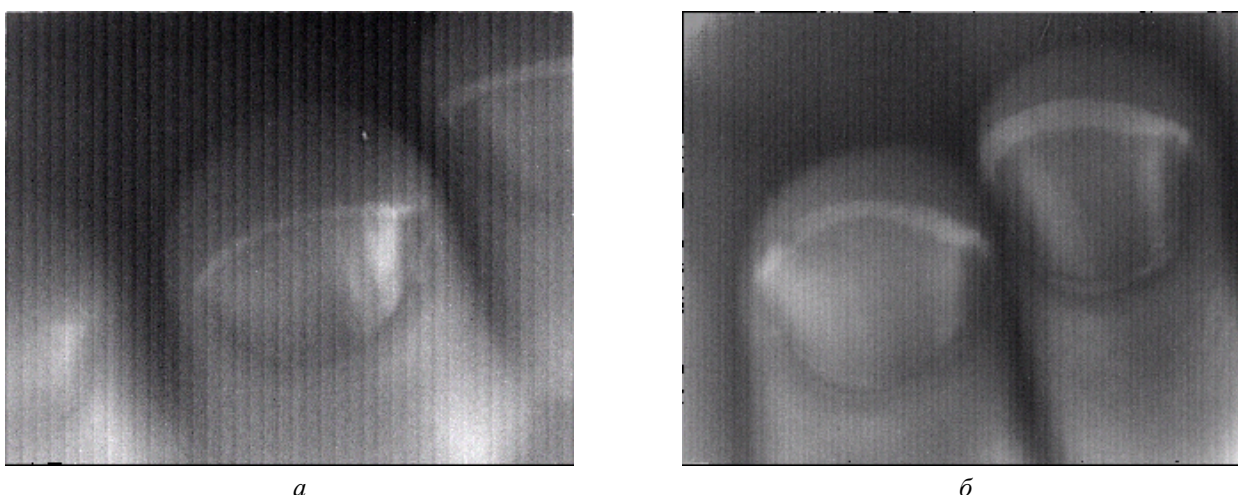


Рис. 5. Инфракрасные изображения в отраженном свете: а — № 135,  $V_{дет} = 2,73$  В, (148 деф),  $N_{def} = 0,18$  %; б — № 136,  $V_{дет} = 3,24$  В, (108 деф.)  $N_{def} = 0,13$  %.

Значения обнаружительной способности на обоих образцах при немного отличающихся напряжениях смещения  $\sim 0,4$ — $0,5$  В превышают  $10^{13}$  см Вт<sup>-1</sup> Гц<sup>1/2</sup>; значения вольтовой чувствительности превышают  $10^{11}$  В/Вт; значения пороговой мощности находятся в диапазоне  $10^{-16}$ — $2,5 \cdot 10^{-15}$  Вт/эл, квантовая эффективность составляет до 70 %.

### Заключение

Использование четырехслойных архитектур  $p^+-B-n-N^+$ -типа с барьером  $p$ -типа, при условии высокого структурного совершенства и частичном подавлении механизмов Оже генерации-рекомбинации в ГЭС InGaAs, позволяет существенно уменьшить диффузионную, генерационно-рекомбинационную и туннельную составляющие темного тока, что в свою очередь дает возможность существенно повысить обнаружительную способность или увеличить рабочую температуру.

Архитектура матриц фотодиодов на основе двойных, тройных и четверных соединений арсенидов InGaAs/InP с использованием барьерного, переходного слоя и дельта-легированных слоев в составе гетероэпитаксиальных структур позволяет реализовывать параметры, близкие к лучшим мировым достижениям. При этом ФПУ пригодны для использования в оптических дальномерах при построении 3D-изображений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига, 2011.
2. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Современное состояние и магистральные направления развития современной фотоэлектроники. — М.: Физматкнига, 2010.
3. Guellec F., Tchagaspanian M., Ballet P., Mollard L., Gout S., Perez A., Fournier M., Chamonal J.-P., Tribolet P. M., Destefanis G. // Proc. SPIE. 2008. Vol. 6940. P. 69402N(1).
4. Richard M., Heinrichs I., Aull Brian F., Marino Richard M., Fouche Daniel G., McIntosh Alexander K., Zayhowski John J.,

Stephens Timothy, O'Brien Michael E., and Albota Marius A., Three-Dimensional Laser Radar with APD Arrays — e-mail: heinrichs@LL.mit.edu.

5. Itzler M. A., Entwistle M., Owens M., Ketan Patel, Xudong Jiang, Slomkowski K., and Rangwala S. // Proc. SPIE. 2010. Vol. 7780. P. 77801M.

6. Ping Yuan, Rengarajan Sudharsanan, Xiaogang Bai, Joseph Boisvert, Paul McDonald, and Eduardo Labios // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8037. P. 803712.

7. Кузнецов П. А., Мощев И. С. / Труды XXIV Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М.: АО «НПО «Орион», 2016 г. С. 213—217.

8. Дирочка А. И., Корнеева М. Д., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 37.

9. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 47.

10. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 82.

11. Anderson R. // Solid-State Electronics. 1962. Vol. 5. P. 341.

12. Болтарь К. О., Чинарева И. В., Лопухин А. А., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 10.

## Performance of SWIR ADP FPAs based on InGaAs heterostructures for 3D-applications

N. I. Iakovleva<sup>1</sup>, K. O. Boltar<sup>1,2</sup>, M. V. Sednev<sup>1</sup>, and A. V. Nikonov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Orion R&P Association  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutsky al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received August 12, 2016

**SWIR 320×256 FPAs based on  $p^+-B-n-N^+$ -heterostructures with InGaAs absorber and InAlAs barrier layers have been developed and investigated. The InGaAs/InAlAs heterostructures are formed by Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE) on the  $n^+$  type InP substrates. The band discontinuity between absorber  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ - and barrier  $In_{0.52}Al_{0.48}As$  layers was removed by grown  $AlInGaAs$  thin  $n$ -layer with gradient composition. Delta-doped layers including into heterostructure are used for barrier smoothing and energy discontinuity removing in valence band. The InGaAs/InP photodiodes performance has been estimated by measuring dark current. An average value of dark current over the photodiode arrays did not exceeded 10 fA.**

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

**Keywords:** InGaAs, InP, Short Wavelength Infrared Region, SWIR, InGaAs/InAlAs heterostructures, Focal Plane Array, FPA, photodetector, dark current, barrier layer.

### REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Photoelectronics. Photodiodes*. (Moscow, Phismatkniga, 2011) [in Russian].

2. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, M. A. Trishenkov, *State-of-the-Art and Development of Present-Day Photoelectronics*. (Moscow, Phismatkniga, 2010) [in Russian].

3. F. Guellec, M. Tchagaspanian, P. Ballet, L. Mollard, S. Gout, A. Perez, M. Fournier, J.-P. Chamonal, P. M. Tribolet, and G. Destefanis, Proc. SPIE. **6940**, 69402N(1) (2008).

4. M. Richard, I. Heinrichs, Brian F. Aull, Richard M. Marino, Daniel G. Fouche, Alexander K. McIntosh, John J. Zayhowski, Timothy Stephens, Michael E. O'Brien, Marius A. Albota, *Three-Dimensional Laser Radar with APD Arrays* (e-mail: heinrichs@LL.mit.edu).

5. Mark A. Itzler, Mark Entwistle, Mark Owens, Ketan Patel, Xudong Jiang, Krystyna Slomkowski, and Sabbir Rangwala, Proc. SPIE **7780**, 77801M, 2010.

6. Ping Yuan, Rengarajan Sudharsanan, Xiaogang Bai, Joseph Boisvert, Paul McDonald, and Eduardo Labios, Proc. SPIE. **8037**, 803712 (2011).

7. P. A. Kuznetsov and I. S. Moshchev, in *Proceedings of XXIV International Scientific and Engineering Conference on Photoelectronics and Night-Vision Devices*, (Moscow, State Scientific Center of the Russian Federation — Orion Research & Production Association, 2016), pp. 213–217.

8. A. I. Dirochka, M. D. Korneeva, and A. M. Filachev, Prikl. Fiz., No. 2, .37 (2011).

9. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, Prikl. Fiz., No. 2, 47 (2011).

10. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, Prikl. Fiz., No. 3, 82 (2011).

11. R. Anderson, Solid-State Electronics **5**, 341 (1962).

12. K. O. Boltar, I. V. Chinareva, A. A. Lopuhin, and N. I. Iakovleva, Prikl. Fiz., No. 5, 10 (2013).