

## Исследование фотодиодов с граничной длиной волны до 2,06 мкм на основе структур InGaAs

К. О. Болтарь, Н. А. Иродов, М. В. Седнев, А. А. Мармалюк, М. А. Ладугин, Ю. Л. Рябоштан

*Представлены результаты исследований вольт-амперных характеристик и спектральной характеристики чувствительности фотодиодов на основе выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии гетероэпитаксиальных структур с поглощающим слоем  $In_{0,67}Ga_{0,33}As$ , легированным Zn, на подложках InP. Фотодиоды изготовлены по меза-технологии. Правая граница спектральной характеристики чувствительности фотодиодов по уровню 0,5 составляет 2,06 мкм при комнатной температуре. Исследованы зависимости спектров fotocувствительности фотодиодов в диапазоне температур 230–300 К.*

*Ключевые слова:* InGaAs, фотодиод, меза-технология, спектральная характеристика, вольтамперная характеристика, темновой ток.

### Введение

В последнее время обозначилась тенденция к использованию гетероэпитаксиальных структур на основе соединений элементов III и V групп для решения задач микрофотоэлектроники. Актуальной задачей здесь является создание матричных фотоприемных устройств (МФПУ) ближнего инфракрасного диапазонов спектра на эпитаксиальных слоях  $In_xGa_{1-x}As/InP$  мегапиксельного формата [1–3, 12].

ваный AlInAs барьерный и пассивирующий слой позволяет изолировать fotocувствительные элементы друг от друга, не открывая поверхность узкозонного полупроводника InGaAs, что одновременно уменьшает ток диффузии электронов [4, 12].

Расширение спектрального диапазона чувствительности до границы окна прозрачности атмосферы 2,2 мкм является важной задачей. Это возможно при увеличении мольной доли  $x$  в fotocувствительном слое  $In_xGa_{1-x}As$ . Неизбежное ухудшение характеристик фотодиодов из-за рассогласования параметра решетки  $In_xGa_{1-x}As$  при  $x \neq 0,53$  с InP-подложкой может быть уменьшено выбором конструкции и технологии буферных слоев гетероструктуры.

Целью данной работы являлось исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) и спектральной характеристики чувствительности фотодиодов на основе выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии гетероэпитаксиальных структур с поглощающим слоем  $In_{0,67}Ga_{0,33}As$ , легированным Zn, на подложках InP.

### Изготовление образцов

Для изготовления фотоприемных матриц в работе использованы структуры, выращенные в АО «НИИ «Полюс» на подложке  $n^+-InP$  методом МОС-гидридной эпитаксии [3, 9] с поглощающим слоем  $In_{0,67}Ga_{0,33}As$ , оптимальная толщина которого составляла  $1,5 \div 3$  мкм для достижения максимального значения токовой чувствительности в спектральном диапазоне  $1 \div 2,1$  мкм. Параметры слоев ГЭС, использованной в работе, представлены в таблице.

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

**Иродов Никита Александрович**<sup>1</sup>, ведущий инженер.

**Седнев Михаил Васильевич**<sup>1</sup>, начальник участка НТК, к.т.н.

**Мармалюк Александр Анатольевич**<sup>3</sup>, начальник НТЦ.

**Ладугин Максим Анатольевич**<sup>3</sup>, начальник отдела.

**Рябоштан Юрий Леонидович**<sup>3</sup>, ведущий инженер-технолог.

<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

(государственный университет).

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

Институтский пер., 9.

<sup>3</sup> АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха».

Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1.

E-mail: bereg@niipolyus.ru

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2017 г.

© Болтарь К. О., Иродов Н. А., Седнев М. В., Мармалюк А. А., Ладугин М. А., Рябоштан Ю. Л., 2017

Для изготовления матричных фотоприемников диапазона 0,9–1,7 мкм перспективно применение  $nVp$ -структур на основе фотодиодов с fotocувствительным  $In_{0,53}Ga_{0,47}As$  и широкозонным барьерным  $Al_{0,48}In_{0,52}As$  слоями с согласованной по периоду решетки подложкой из InP. Нелеги-

Таблица

Параметры фотодиодной гетероэпитаксиальной структуры

№ Структура	Тип структуры	Толщина слоя, нм	Уровень легирования в слоях, см <sup>-3</sup>	Подложка
V-2439(1)	$p^+-\text{In}_{0,67}\text{Ga}_{0,33}\text{As}:\text{Zn}$	150	$5,0 \times 10^{18}$	$n\text{-InP}(100)$
Фотодиодная гетероэпитаксиальная структура	$p\text{-InAs}_{0,3}\text{P}_{0,4}:\text{Zn}$	200	$2,0 \times 10^{18}$	$2 \div 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$
	$\text{In}_{0,67}\text{Ga}_{0,33}\text{As}$	1500	н/л	Толщина: 350 мкм
	$n\text{-InAs}_x\text{P}_{1-x}\text{As}(\text{Si})\text{-буфер}$	1500	$5,0 \times 10^{17}$	Диаметр: 51 мм

Фотодиодные структуры формировали по меза-технологии ионно-лучевым и финишным жидкостным травлением на глубину поглощающего слоя [5–8] с размером тестовых элементов  $40 \times 40$  мкм. Схематическое изображение элементов фотоприемной матрицы представлено на рис. 1.

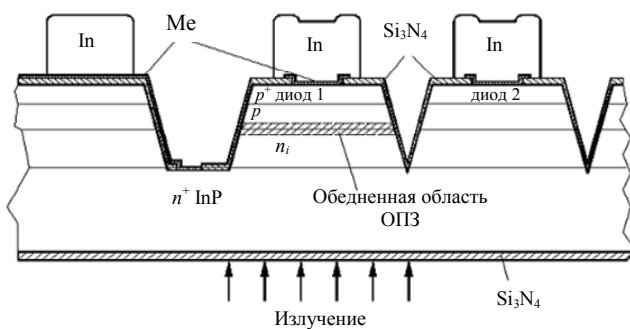


Рис. 1. Схематическое изображение элементов фотоприемной матрицы, изготовленной по меза-технологии.

### Техника эксперимента

Измерения ВАХ и ампер-ваттной чувствительности фотодиодов проводились на зондовой установке, обеспечивающей измерение тока до  $10^{-14}$  А. Источником освещения служил лазерный светодиод с длиной волны излучения 1,55 мкм. Световое пятно площадью около  $1 \text{ см}^2$  получали на обратной поверхности матриц фотодиодов. Измерения темнового тока и фототока при постоянном значении потока излучения  $\Phi = 1,5 \times 10^{-4} \text{ Вт/см}^2$  выполняли в экранированном плотной тканью от фонового излучения пространстве (зондов и матриц фотодиодов) при температуре  $+22$  °С.

Измерения спектральных характеристик фотодиодов проводились на Фурье-спектрометре, обеспечивающим диапазон волновых чисел  $7000 \text{ см}^{-1} < \nu < 500 \text{ см}^{-1}$  с разрешением  $2 \text{ см}^{-1}$ . Измерения проведены при температурах в диапазоне  $230 \div 300 \text{ К}$ .

### Экспериментальные результаты и обсуждение

Типичная темновая ВАХ фотодиодов, изготовленных на основе структуры  $\text{In}_{0,67}\text{Ga}_{0,33}\text{As}$ ,

представлена на рис. 2. Темновые токи при комнатной температуре при обратном напряжении смещения  $-0,1 \text{ В}$  фотодиодов размером  $40 \times 40$  мкм на  $4 \div 5$  порядков больше, чем темновые токи для  $n\text{Vp}$ -структуры  $x = 0,53$  с размером фотодиодов  $20 \times 20$  мкм.

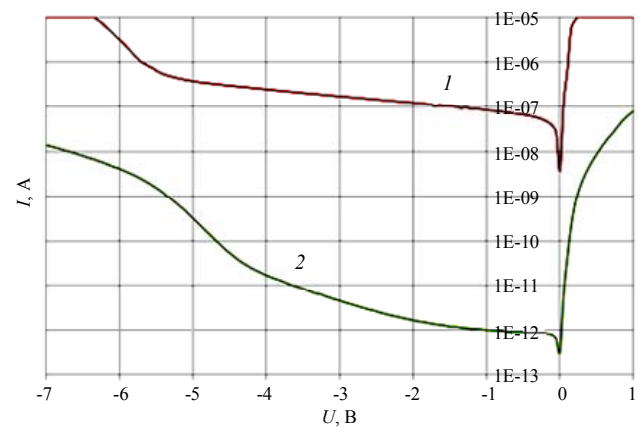


Рис. 2. Темновая ВАХ фотодиода с размером  $40 \times 40$  мкм на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  структуры с  $x = 0,67$  (кривая 1) и темновая ВАХ фотодиода с размером  $20 \times 20$  мкм на основе  $n\text{Vp}$ -структуры с поглощающим слоем  $x = 0,53$  (кривая 2) при комнатной температуре.

Ампер-ваттная чувствительность элемента размером  $40 \times 40$  мкм, измеренная при потоке излучения  $\Phi = 1,5 \times 10^{-4} \text{ Вт/см}^2$ , составляет  $0,44 \text{ А/Вт}$  при напряжении смещения  $-0,1 \text{ В}$ , что с учетом потерь на отражение от освещаемой поверхности дает значение квантовой эффективности 52 % для длины волны излучения 1,55 мкм [11].

На рис. 3 представлена спектральная характеристика фоточувствительности от температуры в диапазоне температур  $-40 \div +25$  °С. На рис. 4 представлена температурная зависимость длины волны правой границы спектра чувствительности фотодиодов. Длина волны правой границы спектра при комнатной температуре  $T = +25$  °С составляет  $2,06 \text{ мкм}$ , что больше значения правой границы спектра  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  с  $x = 0,53$ . Следовательно, изменением состава поглощающего слоя достигается смещение правой границы спектра чувствительности фотоприемных матриц.

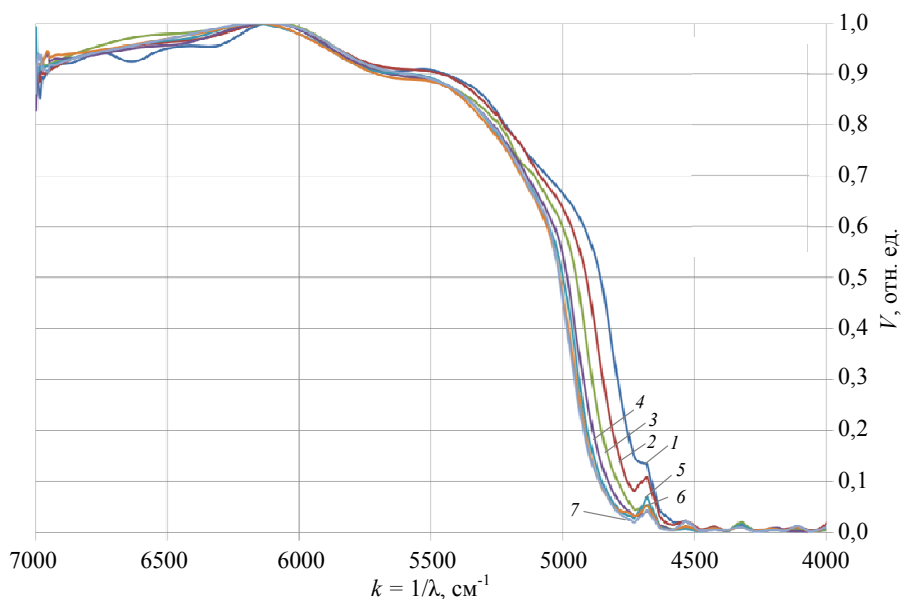


Рис. 3. Изменение спектральной характеристики фоточувствительности в зависимости от различной температуры в диапазоне температур  $-40 \div +25$  °C. (кривая 1 –  $+25$  °C; 2 –  $+2,5$  °C; 3 –  $-14$  °C; 4 –  $-27$  °C; 5 –  $-36$  °C; 6 –  $-40$  °C; 7 –  $-42$  °C). По вертикали отложено значение фотосигнала  $V$  в относительных единицах.

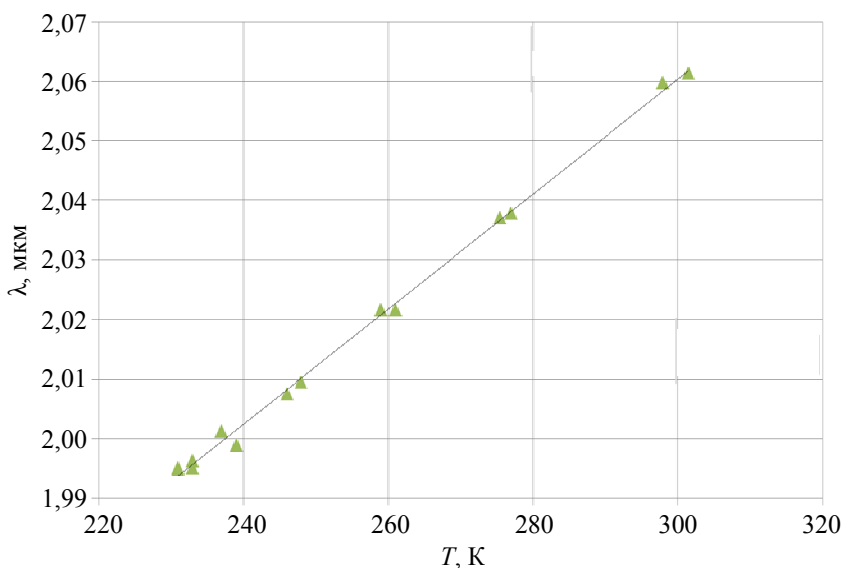


Рис. 4. Температурная зависимость длины волны  $\lambda$  правой границы спектра фотодиодов. Треугольниками отмечены экспериментальные данные.

Исследование спектров фоточувствительности изготовленных тестовых элементов при разных рабочих температурах позволило установить линейную зависимость уменьшения ширины запрещенной зоны поглощающего слоя  $\text{In}_{0,67}\text{Ga}_{0,33}\text{As}$  с ростом температуры.

Из полученных данных по известному соотношению рассчитана ширина запрещенной зоны поглощающего слоя  $E_g$ :

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = 0,6 \text{ эВ}, \quad (1)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света,  $\lambda$  – правая граница спектральной характеристики чув-

ствительности фотодиодов по уровню 0,5, составляющая 2,06 мкм при комнатной температуре.

### Заключение

В работе исследованы фотодиоды на основе выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии гетероэпитаксиальных структур с поглощающим  $\text{In}_{0,67}\text{Ga}_{0,33}\text{As}$ . Основные полученные результаты можно представить следующим образом.

– Длина волны правой границы спектра при комнатной температуре составляет  $\lambda = 2,06$  мкм, что больше значения правой границы спектра фотодиодов на основе традиционного состава  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ .

– Ампер-ваттная чувствительность фотодиода с поглощающим  $\text{In}_{0,67}\text{Ga}_{0,33}\text{As}$  при потоке излучения  $\Phi = 1,5 \times 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup> составляет 0,44 А/Вт при напряжении смещения  $-0,1$  В, что с учетом потерь на отражение от освещаемой поверхности дает значение квантовой эффективности 52 % для длины волны излучения 1,55 мкм.

– Темновые токи при комнатной температуре при обратном напряжении смещения на 4÷5 порядков больше, чем темновые токи для  $n\text{Вр}$ -структуры с  $x = 0,53$ .

На дальнейшее перспективными задачами являются расширение спектрального диапазона до границы окна прозрачности атмосферы 2,2 мкм и уменьшение темновых токов за счет перехода к  $n\text{Вр}$ -структуре.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.

2. Дирочка А. И., Курбатов Л. Н. Фотозлектроника. Базовые лекции по электронике. Т. 2. Твердотельная электроника. – Москва: Техносфера, 2009.

3. Gloersen Per. G. J. Vac. Sci. Technol. 1975. Vol. 12. Jan./Feb. P. 28.

4. Kim J. K., Cich M. J., Keeler G. A., Hawkins S. D., Fortune T. R. // APPLIED PHYSICS LETTERS. 2009. Vol. 95. P. 031112.

5. Sadao Adachi. Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III–V and II–VI Semiconductors. – John Wiley & Sons, Ltd., 2009.

6. Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. – М.: Радио и связь. 1986.

7. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Седнев М. В. Патент РФ № 2308788 от 20.01.06. Способ сборки фотоприемного устройства.

8. Седнев М. В., Зубкова Е. Н., Шаронов Ю. П. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 350.

9. Болтарь К. О., Смирнов Д. В., Савостин А. В., Шаронов Ю. П., Киселева Л. В. Способ изготовления многоэлементного фотоприемника на основе эпитаксиальных структур  $\text{InGaAs/InP}$ . Заявка № 2013118764 от 24.04.13.

10. Шалимова К. В. Физика полупроводников. – М.: Энергия, 1976.

11. Sheela D., Nandita Das Gupta. // Semiconductor Science and Technology. 2008. Vol. 23. P. 035018.

12. Седнев М. В., Болтарь К. О., Иродов Н. А., Демидов С. С. // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 73.

PACS: 85.60.-q

## Research of photodiodes based on the $\text{InGaAs/nBp}$ structures with a boundary wavelength up to 2.06 microns

K. O. Boltar<sup>1,2</sup>, N. A. Irodov<sup>1</sup>, M. V. Sednev<sup>1</sup>, A. A. Marmalyuk<sup>3</sup>, M. A. Ladugin<sup>3</sup>, and Yu. L. Ryaboshtan<sup>3</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 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

<sup>3</sup> Polyus Research Institute, JSC  
3 Vvedenskogo str., Moscow, 117342, Russia  
E-mail: bereg@niipolyus.ru

Received November 28, 2017

*Consideration is given to results of researches of the current-voltage characteristic and spectral characteristic of sensitivity for photodiodes based on heteroepitaxial structures grown up by the MOS hydride epitaxy method. The  $\text{In}_{0,67}\text{Ga}_{0,33}\text{As}$  photodiodes have an absorbing layer, alloyed by Zn on the InP substrates. Photodiodes have been manufactured by mesa technology. The right border of a spectral characteristic of sensitivity of photodiodes on level 0.5 is equal to 2.06 microns at the room temperature. Dependences of photodiodes photosensitivity are investigated in the range of temperatures of 230–300 K.*

**Keywords:** InGaAs, photodiode, mesa technology, spectral characteristic, current-voltage characteristic, dark current.

## REFERENCES

1. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochka, and N. B. Zaletayev, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (2), 131 (2014).
2. A. I. Dirochka and L. N. Kurbatov, *Photoelectronics. Basic lectures on electronics 2. Solid-state electronics*. (Moscow. Technosphere, 2009) [in Russian].
3. Per.G. Gloersen, *J. Vac. Sci. Technol.* **12**, 28 (1975).
4. J. K. Kim, M. J. Cich, G. A. Keeler, S. D. Hawkins, and T. R. Fortune, *Applied Physics Letters* **95**, 031112 (2009).
5. Sadao Adachi, *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors* (JohnWiley& Sons, Ltd., 2009).
6. G. F. Ivanovskiy and V. I. Petrov, *Ion-plasma treatment of materials* (Moscow, Radio Svyaz. 1986) [in Russian].
7. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, and M. V. Sednev. Russian Federation Patent, No. 2308788, January 20, 2006.
8. M. V. Sednev, E. N. Zubkova, and Yu. P. Sharonov, *Usp. Prikl. Fiz.* **1** (3), 350 (2013).
9. K. O. Boltar, D. V. Smirnov, A. V. Savostin, Yu. P. Sharonov, and L. V. Kiseleva. RF Application, No. 2013118764, April 24, 2013.
10. K. V. Shalimova, *Physics of semiconductors* (Energiya, Moscow. 1976) [in Russian].
11. D. Sheela and Nandita Das Gupta, *Semiconductor Science and Technology*, **23**, 035018 ((2008).
12. M. V. Sednev, K. O. Boltar, N. A. Irodov, and S. S. Demidov, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 73 (2015).