

УДК 621.383:621.315.5

## Вольтамперные характеристики фотодиодов матрицы фоточувствительных элементов планарного типа на основе структуры $p\text{-InP}/\text{InGaAs}/n\text{-InP}$

В. М. Акимов, Д. С. Андреев, С. С. Демидов, Н. А. Иродов, Е. А. Климанов

*Исследованы вольтамперные характеристики (ВАХ) отдельных фотодиодов матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) планарного типа на основе гетероэпитаксиальной структуры  $p\text{-InP}/\text{InGaAs}/n\text{-InP}$  формата  $320 \times 256$  элементов с шагом 30 мкм и размером фоточувствительной площадки  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>. При подаче смещения на отдельные ФЧЭ получены большие значения темновых токов и фототоков при слабых засветках, что свидетельствует о наличии связи с соседними элементами. Подача напряжения одновременно на соседние площадки (измерение в режиме “охранного кольца”) приводила к уменьшению темнового и фототока, и при напряжении обратного смещения от -2 до -6 В для различных образцов, величина темнового тока составляла менее 1 нА, а фоточувствительность 0,8 А/Вт. Дано качественное объяснение механизма взаимосвязи между элементами наличием инверсионного слоя на гетероэпитаксиальной границе.*

PACS: 85.60.-q

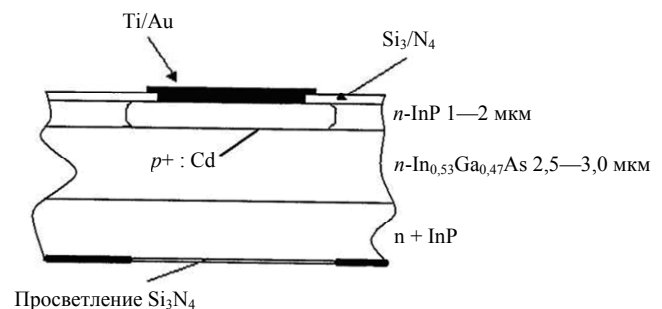
*Ключевые слова:* вольтамперные характеристики, планарный тип, гетероэпитаксиальная структура  $p\text{-InP}/\text{InGaAs}/n\text{-InP}$ , темновой ток, матричные фоточувствительные элементы.

### Введение

Имеется большое количество работ, посвященных исследованиям характеристик диодов и матриц фоточувствительных элементов на основе InP и тройных соединений [1—9]. К сожалению, некоторые проблемы, характерные для матриц планарного типа, например, такие как взаимосвязь между соседними элементами, обсуждаются сравнительно редко. Поэтому нами проведены измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) отдельных фотодиодов матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) и на основании полученных результатов рассмотрены возможные механизмы взаимосвязи соседних элементов.

### Конструкция МФЧЭ

Структура МФЧЭ, на которых выполнялись исследования [2, 3], показана на рис. 1.



*Рис. 1. Схема матрицы фоточувствительных элементов на основе эпитаксиальной структуры  $n\text{-InP}/n\text{-In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/n^+\text{-InP}$*

МФЧЭ изготовлены из эпитаксиальных структур, представляющих собой подложку InP  $n$ -типа ( $n = (2-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) с выращенными на ней слоями  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$   $n$ -типа толщиной 2,5—3,0 мкм ( $n = (4-7) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) и InP  $n$ -типа 1—2 мкм ( $n = (1-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ). При этом  $p$ -область диодов формировалась диффузией Cd, а контакты к ней получали нанесением слоёв Ti/Au.

Исследованы МФЧЭ формата  $320 \times 256$  элементов с шагом 30 мкм при размерах  $p$ -области  $20 \times 20$  мкм.

Акимов Владимир Михайлович, главный специалист<sup>1</sup>.  
Андреев Дмитрий Сергеевич, вед. инженер-технолог<sup>1</sup>.  
Демидов Станислав Стефанович, ст. научный сотрудник<sup>1</sup>.  
Иродов Никита Александрович, инженер<sup>1</sup>.  
Климанов Евгений Алексеевич, гл. научный сотрудник<sup>1</sup>, профессор<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46/2.

Тел. (499) 374 94-00. E-mail: orion@orion-ir.ru

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

(государственный университет).

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

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2014 г.

© Акимов В. М., Андреев Д. С., Демидов С. С., Иродов Н. А., Климанов Е. А., 2014

**Результаты исследований**

Пример типичной ВАХ для подключенного в измерительную цепь одного фотодиода (ФЧЭ), показан на рис. 2 (остальные диоды в цепи не подключены).

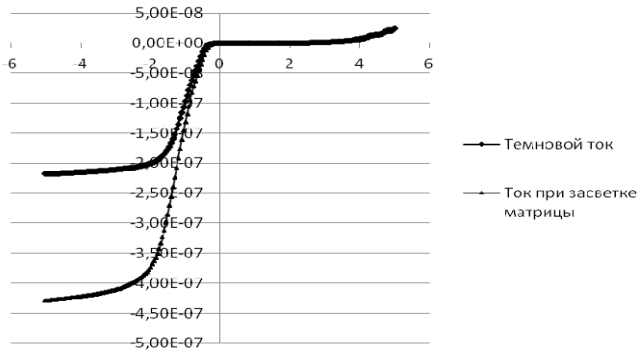


Рис. 2. Значения темнового тока и фототока, полученные при подключении к измерительной схеме одного диода-пикселя

Из полученных характеристик следуют следующие выводы.

1. Контакт металла к *p*-области, видимо, представляет собой диод Шоттки с очень малыми обратными токами, что следует из вида прямой ветви ВАХ. Но при отрицательных напряжениях на структуре диод включён в прямом направлении и его влияние на выходные характеристики невелико.

2. Большой темновой ток отдельного ФЧЭ (с размерами 20×20 мкм), а также большой фототок при сравнительно слабых засветках свидетельствуют о наличии связи с соседними элементами. Поэтому дальнейшие измерения ВАХ проводились на элементах, у которых контакты соседей замыкались и подключались к схеме в режиме «охранного кольца», то есть на них подавалось напряжение, равное или ненамного отличающееся от напряжения на исследуемом элементе структуры. Здесь отличие от обычного охранного кольца, применяемого в фотодиодах для снижения влияния поверхностных токов утечки, состоит в том, что в нашем случае оно не сплошное, а образовано отдельными элементами.

ВАХ диодов с «охранным кольцом» показаны на рис. 3 и 4. Такой вид приведенных зависимостей, вероятно, связан, как это отмечалось в работе [2], с особенностями работы *pin*-диодов. При небольших отрицательных напряжениях, приложенных к структуре, процесс диффузии неравновесных носителей вдоль слоя InGaAs преобладает над процессом дрейфа этих носителей под действием приложенного поля, и между смежными ФЧЭ существует взаимосвязь. Об этом свидетель-

ствуют большие величины темнового тока и фототока. При увеличении напряжения на структуре преобладает дрейф носителей под действием поля и взаимосвязь между элементами уменьшается. Резкого увеличения токов на начальном участке характеристик может не наблюдаться, если на охранное кольцо подать отрицательное смещение относительно исследуемого диода (в диапазоне -1 ÷ -1,5 В).

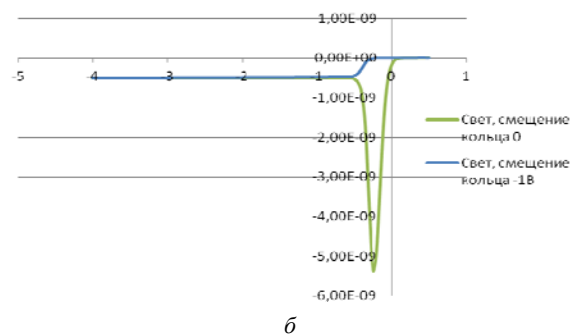
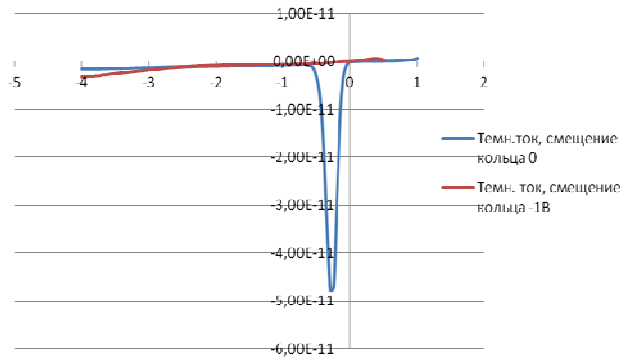


Рис. 3. ВАХ отдельных диодов структуры со сравнительно слабой связью между соседними диодами

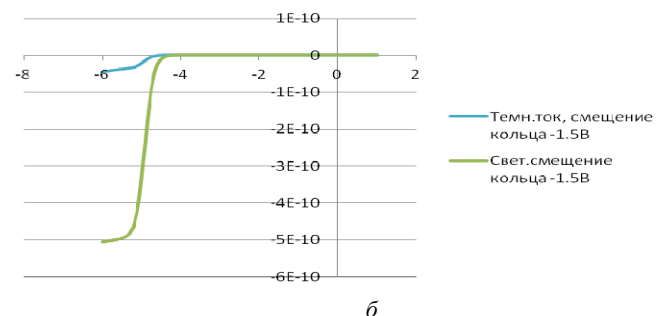
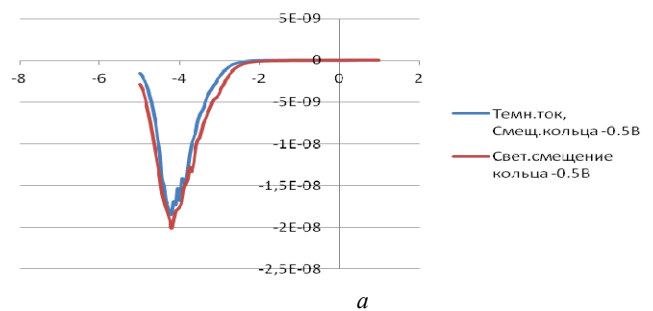


Рис. 4. ВАХ диодов-пикселей структуры с сильной связью между соседними диодами

При этом величина напряжения, выше которой темновой и фототок соответствуют отдельным ФЧЭ, отличается для различных образцов и составляет от -2 до -6 В (рис. 3 и 4), что соответствует различной величине взаимосвязи при малых напряжениях. При достижении указанных напряжений величина темнового тока отдельного ФЧЭ менее 1 пА, а фоточувствительность в спектральной полосе, ограниченной кремниевым фильтром и спадом собственной чувствительности фотодиода, составляет -0,8 А/Вт. Однако эти значения могут быть несколько завышены, так как нет полной уверенности в том, что неравновесные носители собираются с площадки  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>.

Одной из возможных причин взаимосвязи между элементами в фотодиодах является образование инверсионных слоев на границе раздела диэлектрик-полупроводник. Однако проведенные измерения С—V-характеристик на рассмотренных структурах показали отсутствие инверсионных слоев.

Возможно, что причина появления таких аномальных ВАХ у МФЧЭ обусловлена положением диффузионной границы раздела  $p$ — $n$ -перехода в эпитаксиальных слоях. Если она не достигла узкозонного слоя InGaAs, то мы будем иметь дело со структурой  $p$ -InP/ $n$ -InP/ $n$ -InGaAs/ $n$ <sup>+</sup>-InP. (как и прежде, мы не рассматриваем влияние на характеристики диода Шоттки.) Воспользовавшись сведениями о параметрах полупроводников [10, 11], была построена зонная диаграмма такой структуры, приведенная на рис. 5.

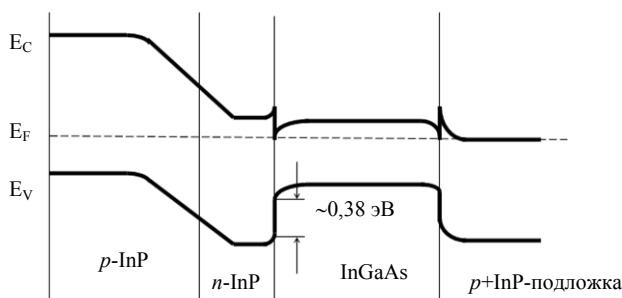


Рис. 5. Зонная диаграмма (качественно) структуры  $p$ -InP/ $n$ -InP/ $n$ -InGaAs/ $p$ <sup>+</sup>-InP

Из этой диаграммы следует, что узкозонный слой InGaAs представляет собой потенциальную яму для дырок, что, разумеется, скажется на протекании тока в направлении, перпендикулярном эпитаксиальным слоям. В то же время препятствий для диффузии или дрейфа неравновесных дырок вдоль слоя нет. Вероятно, этим и объясняется

аномальное поведение некоторых образцов, связанное с образованием дырочного слоя из-за эффекта захвата дырок на гетерогранице, уже известного из литературы. [12, 13].

## Заключение

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Некоторые особенности зависимости ВАХ фотодиодов от напряжения «охранного кольца» можно объяснить наличием потенциальных барьеров на зонной диаграмме гетероэпитаксиальной структуры. Величина этих барьеров в значительной степени определяется положением границы раздела диффузионного  $p$ — $n$ -перехода относительно границ  $p$ -InP/InGaAs/ $n$ -InP.

2. Уменьшение взаимосвязи в матрицах фотодиодов в гетероэпитаксиальных слоях  $p$ -InP/InGaAs/ $n$ -InP обеспечивается большим обратным напряжением смещения фотодиода.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9.

## Литература

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига, 2011.
2. Андреев Д. С., Гришина Т. Н., Залетаев Н. Б. и др. // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 86.
3. Огнева О. В., Чинарёва И. В., Забенькин О. Н. и др. Патент на изобретение № 2318272. Зарегистрировано в Госреестре изобретений РФ 27 февраля 2008 г.
4. Андреев Д. С., Чинарёва И. В. Заявка на госрегистрацию топологии интегральной схемы. 2011.
5. Андреев Д. С., Болтарь К. О., Власов П. В. и др. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 47.
6. Zemel A. and Galland M. // Journal of Applied Physics. 1988. V. 64. No. 11. P. 6552.
7. Селяков А. Ю. // Прикладная физика. 2007. № 4. С. 75.
8. Андреев Д. С., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д. и др. // Труды 22-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 22—25 мая 2012 г., Москва, ФГУП «НПО «Орион». С. 138.
9. Андреев Д. С., Залетаев Н. Б., Трищенко М. А. и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 76.
10. Goldberg Yu. A. and N. M. Shmidt Handbook Series on Semiconductor Parameters. — London: World Scientific, 1999.
11. www.ioffe.rssi.ru
12. Bishoff J. C. et al. // Journal de Physique colloque. 1988. V. 49. No. C4. P. 329.
13. Y. Christ opher Dries, Tara Martin, Wei Huang, et al. // Proc. SPIE. 2003. V. 5074. P. 11.

## The current-voltage characteristics of photodiodes of the planar type FPA based on *p*-InP/InGaAs/*n*-InP structure

V. M. Akimov, D. S. Andreev, S. S. Demidov, N. A. Irodov, and E. A. Klimanov

Orion R&P Association  
46/2 Entuziastov shosse, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received September 26, 2014

*The current-voltage characteristics (CVC) of the individual diodes-pixel of planar type Focal Plane Array (FPA) based on a heteroepitaxial structure p-InP/InGaAs/n-InP has been researched. The format 320×256 pixels with a 30 μm pitch and the photosensitive area of 20×20μm. The high dark current of an individual PSEs and a high photocurrent with weak lighting has been obtained, that show of communication with the neighboring contact. To reduce interconnection of neighboring contact, we close their. Measurement carried out with a "guard ring". When the reverse bias voltage applied value from -2 V to -6 V, depending of the chosen samples, a dark current value less than 1 pA, and photosensitivity 0.8 A/watt.*

PACS: 85.60.-q

*Keywords:* current-voltage characteristics, planar type, heteroepitaxial structure p-InP/InGaAs/n-InP, dark current, FPA.

### References

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
2. D. S. Andreev, T. N. Grishina, N. B. Zaletaev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 86 (2012).
3. O. V. Ogneva, I. V. Chinareva, O. N. Zaben'kin, et al., RF Patent No.2318272 (February 27, 2998).
4. D. S. Andreev and I. V. Chinareva, Invention Application. RF (2011).
5. D. S. Andreev, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 47 (2014).
6. A. Zemel and M. Galland, *Journal of Applied Physics* **64**, 6552 (1988).
7. A. Yu. Selyakov, *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 75 (2007).
8. D. S. Andreev, K. O. Boltar, I. D. Burlakov, et al., in *Proc. XXII Intern. Conf. Photoelectronics* (NPO Orion, Moscow, May 22-25, 2012), pp.138-139.
9. D. S. Andreev, N. B. Zaletaev, M. A. Trishenkov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 76 (2013).
10. Yu. A. Goldberg and N. M. Schmidt, *Handbook. Series on Semiconductor Parameters* (World Scientific, London, 1999).
11. www.ioffe.rssi.ru
12. J.C. Bishoff et al., *Journal de Physique Colloque* **49**, 329 (1988).
13. Y. Christ opher Dries, Tara Martin, Wei Huang, et al., *Proc. of SPIE* **5074**, 11 (2003).