

УДК 621.315.5

## Исследование планарной матрицы $p-i-n$ -фотодиодов на основе InGaAs с $p-n$ -переходами уменьшенных размеров

Н. Б. Залетаев, К. О. Болтарь, А. А. Лопухин, И. В. Чинарёва, Э. В. Габбасова

*Проведено исследование планарной матрицы  $p-i-n$ -фотодиодов формата 320×256 на гетероэпитаксиальной структуре InGaAs/InP с размерами  $p-n$ -переходов 9×9 мкм при шаге матрицы 30 мкм. Уменьшение размеров  $p-n$ -переходов по сравнению с аналогичными матрицами, имеющими размер  $p-n$ -переходов 25×25 мкм, при несущественном снижении токовой чувствительности элементов матрицы привело к снижению темновых токов элементов на полтора порядка величины и к увеличению обнаружительной способности фотоприёмного устройства с такой матрицей.*

PACS: 85.60.-q

*Ключевые слова:* матрицы,  $p-i-n$ -фотодиод, гетероэпитаксиальные структуры, InGaAs/InP, топология, коротковолновый ИК-диапазон.

### Введение

Приборы ночного видения нового поколения на основе матриц  $p-i-n$ -фотодиодов на InGaAs находят в настоящее время широкое применение как в военной, так и в гражданской сферах [1].

Целью данной работы являлось исследование параметров планарной фотоприёмной матрицы  $p-i-n$ -фотодиодов на InGaAs с  $p-n$ -переходами уменьшенных размеров (по сравнению с шагом элементов в матрице) для создания приборов с улучшенными параметрами и, в первую очередь, для обеспечения следующих факторов:

- улучшения обнаружительной способности за счёт снижения темновых токов элементов матрицы без существенного ухудшения их токовой чувствительности,
- снижения уровня дефектности.

Необходимо также было дать теоретическое обоснование топологии матрицы  $p-i-n$ -фотодиодов с  $p-n$ -переходами уменьшенных размеров.

В ходе работы предполагалось экспериментально исследовать темновой ток и токовую чув-

ствительность элементов матрицы  $p-i-n$ -фотодиодов формата 320×256 на гетероэпитаксиальной структуре InGaAs/InP с  $p-n$ -переходами уменьшенных размеров (в сравнении с аналогичными матрицами, имеющими размер  $p-n$ -переходов 25×25 мкм [2]), а также обнаружительную способность матричного фотоприёмного устройства с такой матрицей. Экспериментальные результаты, конечно, должны быть сопоставлены с теоретическими предположениями.

### Особенности распределения электрического поля в матрице $p-i-n$ -фотодиодов с $p-n$ -переходами уменьшенных размеров

Рассмотрим систему конденсаторов, расположенных на бесконечной диэлектрической пластине, на верхней стороне которой в узлах ячеек воображаемой решётки с квадратными ячейками расположены центры круглых металлических контактов с диаметром существенно меньшим шага решётки (рис. 1). Нижняя сторона пластины целиком металлизирована. Все верхние контакты соединены между собой. Между верхними и нижним контактами подано напряжение.

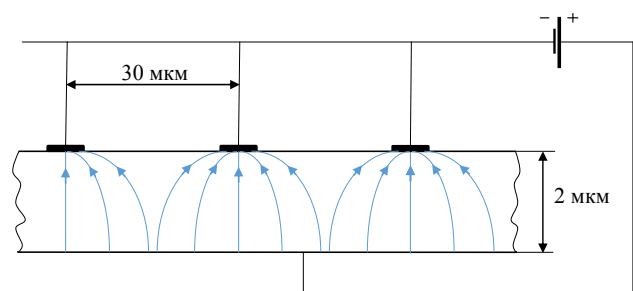


Рис. 1. Система конденсаторов, вид сбоку

Залетаев Николай Борисович, ведущий научный сотрудник<sup>1</sup>.  
Болтарь Константин Олегович, начальник НТК<sup>1</sup>, профессор<sup>2</sup>.

Лопухин Алексей Алексеевич, ведущий научный сотрудник<sup>1</sup>.  
Чинарёва Инна Викторовна, ведущий инженер<sup>1</sup>.

Габбасова Эльвира Вильмировна, студент<sup>2</sup>.  
<sup>1</sup>АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.  
Тел. 8 (499) 373-60-11. E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (МФТИ).  
Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,  
Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 7 июля 2015 г.

© Залетаев Н. Б., Болтарь К. О., Лопухин А. А., Чинарёва И. В., Габбасова Э. В., 2015

В силу симметрии, что также подтверждается и теоретическим расчётом, в такой бесконечной системе конденсаторов все линии электрического поля, приходящие к каждому круглому контакту, на общем (нижнем) контакте исходят в пределах границ ячейки другой воображаемой решётки с квадратными ячейками с тем же шагом, причём центр ячейки находится под центром этого круглого контакта. Или, другими словами, границы воображаемых ячеек являются линиями на нижнем контакте, из которых силовые линии электрического поля расходятся в разные стороны — к круглым контактам своих ячеек, а внутри каждой ячейки силовые линии электрического поля идут только в сторону круглого контакта, расположенного в данной ячейке. Форма контакта не является принципиальной. Необходимо отметить, что в конечной системе конденсаторов описанная картина несколько нарушается для краевых конденсаторов.

Аналогом описанной выше системы конденсаторов является матрица  $p-i-n$ -фотодиодов, где отдельные (верхние) контакты являются  $p-n$ -переходами, в которой при достаточно высоком рабочем напряжении чувствительная область практически является диэлектриком, а область сбора фотогенерированного заряда в каждом фотодиоде в горизонтальной плоскости (эффективная фоточувствительная площадка) будет иметь форму квадрата со стороной, равной шагу матрицы. То есть, несмотря на уменьшенные, по сравнению с шагом матрицы, размеры  $p-n$ -переходов, фоточувствительные площадки этих фотодиодов будут полностью, без зазоров заполнять всю площадь матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ).

Некоторое отличие в распределении электрического поля в рассмотренном конденсаторе и в  $p-i-n$ -фотодиоде заключается в том, что из-за наличия объёмного заряда электрическое поле в диоде будет более неоднородным, и его силовые линии вблизи  $p-n$ -перехода, где поле больше, будут идти плотнее, чем в конденсаторе. Но для данной работы это отличие не является принципиальным. В частности, оно не влияет на форму и размер фоточувствительных площадок элементов.

Необходимо также отметить, что для рассматриваемой топологии матрицы на краях фоточувствительных площадок силовые линии электрического поля расположены менее плотно и, соответственно, поле имеет меньшую напряжённость, чем в центре площадок, где линии поля практически прямые. В этом случае для полного сбора фотогенерированного заряда время жизни носителей заряда должно быть достаточно большим, чтобы не было рекомбинации носителей, генерированных вблизи краёв площадок, при их

движении к контактам. Невыполнение этого условия может несколько снизить величину токовой чувствительности. Этот эффект понижения токовой чувствительности может быть несколько скомпенсирован диффузионным переносом фотогенерированных носителей от краёв площадки к её центру, где больше поле и больше вынос носителей в контакты. Это можно объяснить следующим образом. Предположим, что темп генерации носителей одинаковый в пределах некоторой фоточувствительной площадки (то есть в некотором фотодиоде — элементе матрицы). При уменьшенном размере  $p-n$ -перехода напряжённость электрического поля будет убывать к краям площадки. Следовательно, скорость движения носителей заряда у краёв площадки будет меньше, чем в центре (так как их скорость пропорциональна полю). Значит, носители заряда будут покидать область у краёв площадки медленнее. Следовательно, концентрация носителей будет расти к краям площадки, а градиент концентрации и, соответственно, диффузионный ток фотогенерированных носителей, пропорциональный этому градиенту, будут направлены к центру площадки. Такой механизм дополнительного сбора фотогенерированных носителей был упомянут в работе [3]. Данный механизм также способствует снижению взаимосвязей между соседними элементами в матрицах  $p-i-n$ -фотодиодов.

### Результаты экспериментальных исследований

Исследования проводились на матричном фотоприёмном устройстве формата  $320 \times 256$ , содержащем мультиплексор, состыкованный с планарной матрицей  $p-i-n$ -фотодиодов на основе гетерозипитаксиальной структуры  $\text{InGaAs/InP}$  с размерами  $p-n$ -переходов  $9 \times 9$  мкм при шаге матрицы 30 мкм. Толщина слоя  $\text{InGaAs}$  составляла 3,8 мкм. При этом  $p-n$ -переходы формировались диффузией цинка.

Облучение матрицы производилось со стороны подложки (толщина около 350 мкм), которая являлась общим контактом матрицы. Исследования проводились при комнатной температуре матрицы. Исследуемые параметры — темновые токи, токовая чувствительность и обнаружительная способность — измерялись в режиме накопления с мультиплексированием. Изменялись заряды, накопленные на емкостях в ячейках мультиплексора на основе трансимпедансных усилителей с емкостями накопления в цепи обратной связи. Во всех измерениях величина этих емкостей составляла 10 фФ. Накопленные заряды считывались схемой опроса ячеек и через блок управления и считывания передавались на аналого-цифровой преобразователь в

составе компьютера для последующей обработки в режиме реального времени.

Были измерены распределения значений темнового, шумового и фото- токов по элементам матрицы при напряжениях на матрице фоточувствительных элементов -0,43, -2,04 и -4,52 В. На рис. 2 представлена гистограмма распределения темновых токов по элементам при напряжении -2,04 В. Видно, что максимум распределения находится вблизи значения 10 фА. При напряжении -0,43 В этот максимум находится вблизи 3,8 фА, при -4,52 В — вблизи 33 фА. Эти значения соответствуют плотностям темнового тока 1,1 нА/см<sup>2</sup>, 0,42 нА/см<sup>2</sup>, и 3,67 нА/см<sup>2</sup> соответственно. Наибольший разброс наблюдался при напряжении -4,52 В. У лучших образцов матриц с размерами *p-n*-переходов 25×25 мкм темновые токи составляли порядка 300 фА, что соответствовало плотности тока около 30 нА/см<sup>2</sup>.

Для сравнения приведём данные, опубликованные компанией Judson Teledyne (США) в 2012 году. Там были получены следующие средние значения плотностей темновых токов при комнатной температуре, а именно: 2,2 нА/см<sup>2</sup> для ячейки 10×10 мкм, 2,54 нА/см<sup>2</sup> для ячейки 12×12 мкм, 2,05 нА/см<sup>2</sup> для ячейки 15×15 мкм и 2,04 нА/см<sup>2</sup> для ячейки 20×20 мкм [4].

Максимумы распределений значений токовой чувствительности в максимуме спектральной характеристики ( $\lambda_{\text{max}} = 1,5 \text{ мкм}$ ) по элементам МФЧЭ для всех трех напряжений находятся около 0,56 А/Вт. На рис. 3 представлена гистограмма её распределения по элементам при напряжении -2,04 В. Полученное значение токовой чувствительности несколько ниже, чем было в матрицах с размерами *p-n*-переходов 25×25 мкм ( $\approx 0,8 \text{ А/Вт}$ ) и расчётной величины  $S_{i\lambda, \text{max}} = \frac{q\lambda_{\text{max}}}{hc} \eta = 0,97 \text{ А/Вт}$

(при квантовой эффективности  $\eta = 0,8$  и полном сборе фотогенерированного заряда,  $q$  — заряд электрона,  $hc/\lambda_{\text{max}}$  — энергия фотона). Это может быть объяснено соображениями, приведенными в конце предыдущего раздела.

Максимумы распределений обнаружительной способности в максимуме спектральной характеристики по каналам матричного фотоприёмного устройства (МФПУ) для напряжений -0,43 и -2,04 В находятся вблизи величин  $2,03 \times 10^{13} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$  и  $1,82 \times 10^{13} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$  соответственно. При напряжении -4,52 В максимум перемещается к величине  $1,28 \times 10^{13} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . У лучших образцов МФПУ с аналогичной матрицей с размерами *p-n*-переходов 25×25 мкм обнаружительная способность составляла около  $10^{13} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ .

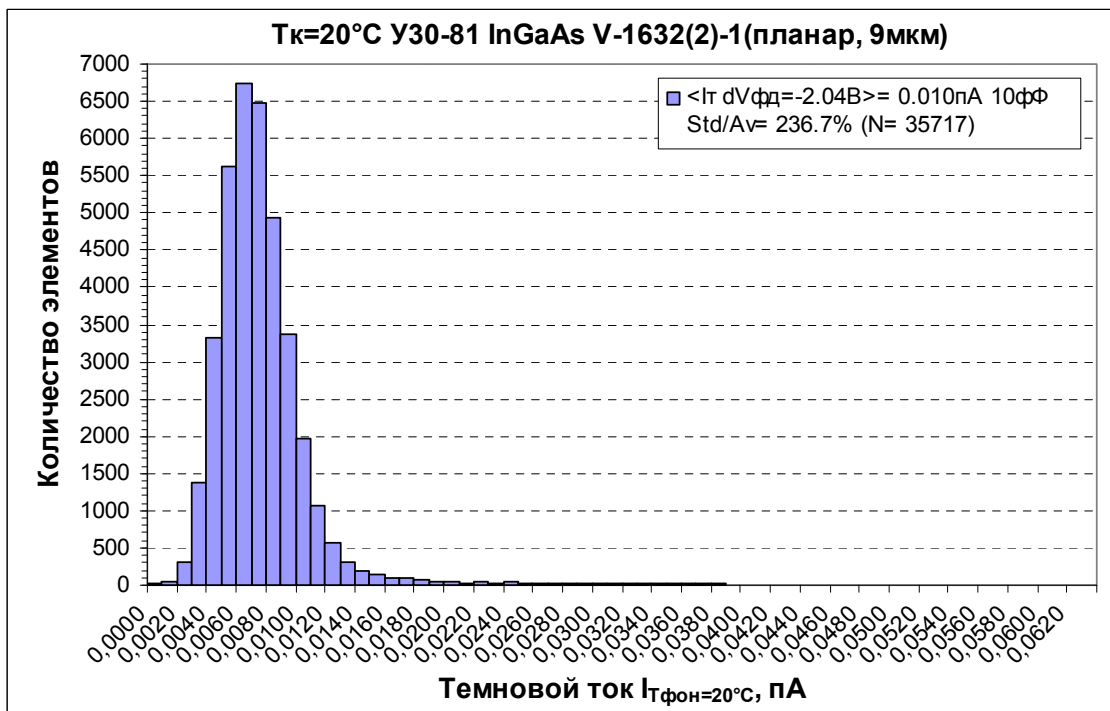


Рис. 2. Гистограмма распределения темновых токов по элементам МФЧЭ при напряжении на МФЧЭ -2,04 В. Выборка по 35717 элементам

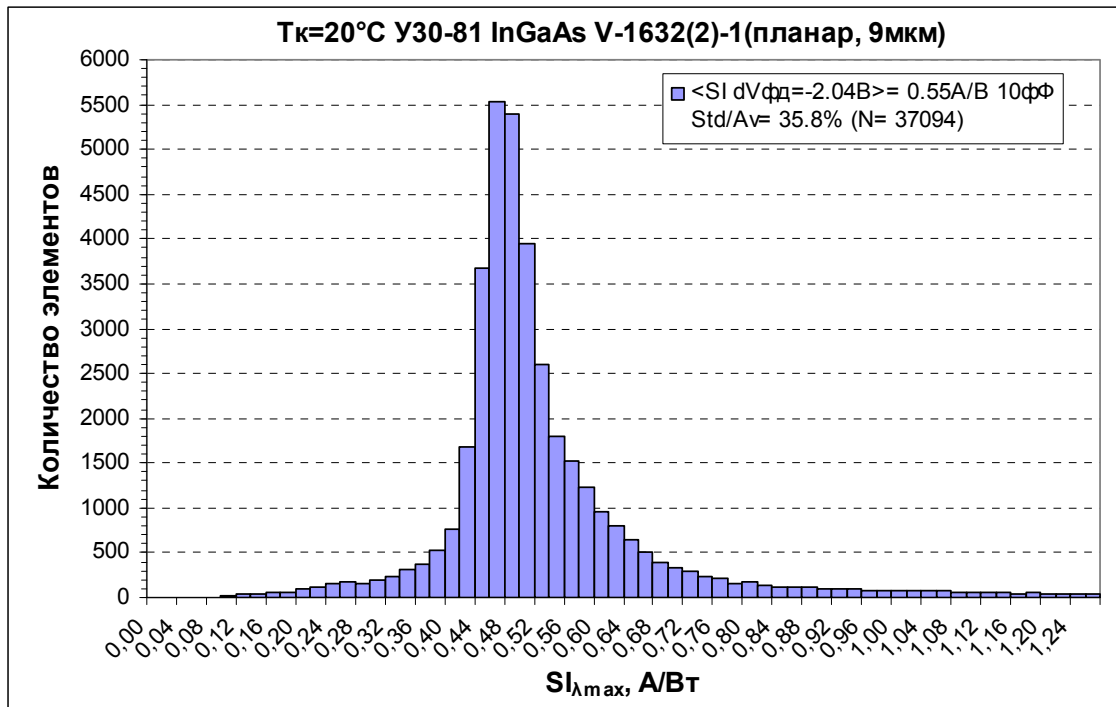


Рис. 3. Гистограмма распределения токовой чувствительности в максимуме спектральной характеристики ( $\lambda_{\max} = 1,5 \text{ мкм}$ ) по элементам МФЧЭ при напряжении на МФЧЭ  $-2,04 \text{ В}$ . Выборка по 37094 элементам

По формуле  $D_{\lambda_{\max}}^* = \frac{S_{i\lambda_{\max}}}{\sqrt{2qJ_T}}$  и значениям

темновых токов в максимумах распределений для разных напряжений оценим, какой могла бы быть  $D_{\lambda_{\max}}^*$ , если бы она определялась дробовыми шумами темновых токов  $I_T$  фотодиодов матрицы:

$$I_{\emptyset} = \sqrt{2qI_T\Delta f} = \sqrt{\frac{qI_T}{T_n}}$$

ная способность для напряжения  $-0,43 \text{ В}$  составляет  $4,91 \times 10^{13} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$  (эксперимент  $2,03 \times 10^{13}$ ), для  $-2,04 \text{ В}$  —  $2,93 \times 10^{13} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$  (эксперимент  $1,82 \times 10^{13}$ ), для  $-4,52 \text{ В}$  —  $1,66 \times 10^{13} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$  (эксперимент  $1,28 \times 10^{13}$ ). В нашем экспериментальном случае она, вероятно, определяется шумами мультиплексора, приближаясь к расчётному значению при напряжении  $-4,52 \text{ В}$ .

### Заключение

Рассмотрена топология планарной матрицы  $p-i-n$ -фотодиодов, в которой поперечные размеры  $p-n$ -переходов существенно меньше шага матрицы. Теоретические расчёты показали, что в этом случае, несмотря на уменьшенные размеры  $p-n$ -перехода, эффективная фоточувствительная площадка каждого фотодиода имеет квадратную форму, со сторонами, равными шагу матрицы, и центр этой площадки совпадает с центром  $p-n$ -перехода. Таким образом, фоточувствительные площадки

фотодиодов будут полностью, без зазоров заполнять всю площадь матрицы.

Проведенное экспериментальное исследование матричного фотоприёмного устройства с планарной матрицей  $p-i-n$ -фотодиодов формата  $320 \times 256$  с шагом  $30 \text{ мкм}$  на основе гетероэпитаксиальной структуры InGaAs/InP с  $p-n$ -переходами квадратной формы размером  $9 \times 9 \text{ мкм}$  показало значительное (до полутора порядков величины) снижение темновых токов элементов матрицы и увеличение обнаружительной способности МФПУ (достигала значения  $2 \times 10^{13} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$  для  $\lambda_{\max}$  спектральной чувствительности) по сравнению с аналогичными матрицами, имеющими размер  $p-n$ -переходов  $25 \times 25 \text{ мкм}$ , причем при незначительном (около 40 %) уменьшении токовой чувствительности.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
2. Андреев Д. С., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д. и др. XXII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 22–25 мая 2012, ФГУП «НПО «Орион». — М., Труды конференции. С. 138.

3. Rouvié A., Reverchon J.-L., Huet O., et al. // Proceedings of SPIE. 2012. V. 8353. P. 835308-1.

4. Yuan H., Meixell M., Zhang J., et al. // Proceedings of SPIE. 2012. V. 8353. P. 835309-1.

## Study of the InGaAs planar $p-i-n$ photodiode focal plane array with $p-n$ junctions of reduced sizes

N. B. Zaletaev, K. O. Boltar, A. A. Lopukhin, I. V. Chinareva, and E. V. Gabbasova

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

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

Received July 7, 2015

*Study of a 320×256 InGaAs planar  $p-i-n$  photodiode focal plane array with the  $p-n$  junctions of 9×9 μm size and the pitch of 30 μm was carried out. Such a reduction of  $p-n$  junction sizes as compared with similar 320×256 arrays with the  $p-n$  junctions of 25×25 μm size and the same pitch has resulted in inessential decrease in responsivity of the photodiodes with decrease of dark currents of the photodiodes by 1.5 orders of magnitude and some increase in detectivity of the array.*

PACS: 85.60.-q

*Keywords:* InGaAs, heterostructure,  $p-i-n$  photodiode, FPA, topology, SWIR band.

### REFERENCES

1. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochka, et al., Uspekhi Prikladnoi Fiziki 2, 131 (2014).
2. D. S. Andreev, K. O. Boltar, I. D. Burlakov, et al., in Proc. XXII Intern. Conf. Photoelectronics (NPO Orion, Moscow, May 22–25, 2012). P. 138.
3. A. Rouvié, J.-L. Reverchon, O. Huet, et al., Proc. SPIE 8353, 835308-1 (2012).
4. H. Yuan, M. Meixell, J. Zhang, et al., Proc. SPIE 8353, 835309-1 (2012).