

УДК 621.315.5

## Исследование темновых токов в матрицах из InGaAs/InP

Д.С. Андреев, А.А. Лопухин, П.Е. Хакуашев, И.В. Чинарёва

*Исследованы элементы планарной фоточувствительной матрицы на основе гетероэпитаксиальной структуры InGaAs/InP. Формат матрицы 320x256 пикселей с шагом 30 мкм. Представлено распределение темнового тока по элементам матрицы при двух значениях напряжения смещения. Исследованы вольт-амперные характеристики тестовых элементов различной площади. На основании этих исследований определены составляющие плотности темнового тока, зависящие от объёма и периметра элементов. Для объёмной составляющей плотности темнового тока получено значение  $3 \cdot 10^{-7}$  А/см<sup>2</sup> при напряжении 5 В. Оценено эффективное время жизни носителей в области пространственного заряда  $p$ - $n$ -перехода  $\tau_{эфф} = 95$  нс.*

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

Ключевые слова: InGaAs, матрица, вольт-амперная характеристика, темновой ток, эффективное время.

### Введение

Зависимость обнаружительной способности  $D^*$  фотодиода в максимуме спектральной чувствительности от плотности темнового тока при достаточно большом обратном смещении определяется выражением:

$$D^* = \frac{S(\lambda_{\max})}{\sqrt{2qJ_m}}, \quad (1)$$

где  $q$  – заряд электрона;  $J_m$  – плотность темнового тока;  $S(\lambda_{\max})$  – токовая чувствительность в максимуме спектральной чувствительности [1].

Чувствительность зависит от длины волны излучения (от энергии фотона) и связана с квантовой эффективностью соотношением:

$$S(\lambda_{\max}) = Gq\eta_{\text{фд}}/h\nu, \quad (2)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  – частота фотона,  $G$  – коэффициент сбора заряда фотогенерированных носителей в фотодиоде.

В реальных фотодиодах темновой ток определяется главным образом дефектами в  $p$ - $n$ -переходе и поверхностными утечками. В правильно спроектированном и изготовленном  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиоде суммарный темновой ток, складывающийся из тока  $I_{m \text{ ОПЗ}}$  обусловленного процессами генерации–рекомбинации в области пространственного заряда, и диффузионного темнового тока неосновных носителей из квазинейтральных областей  $I_{m \text{ диф}}$  может быть весьма мал при низких напряжениях смещения [2].

Андреев Дмитрий Сергеевич, вед. инженер-технолог  
Лопухин Алексей Алексеевич, главный специалист  
Хакуашев Павел Евгеньевич, начальник ПТЦ 1  
Чинарева Инна Викторовна, вед. инженер-технолог  
ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46/2.  
Тел.: (495) 672-20-31. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2013 г.

© Андреев Д.С., Лопухин А.А., Хакуашев П.Е., Чинарева И.В., 2014

В настоящей работе приведены результаты исследования элементов фоточувствительной матрицы на основе гетероэпитаксиальной структуры InGaAs/InP. Формат матрицы 320x256 пикселей с шагом 30 мкм [3].

### Материал и изготовление прибора

Матрица изготавливалась по планарной технологии на эпитаксиальной структуре InP/InGaAs, выращенной на подложке  $n^+$ -InP методом МОС-гидридной эпитаксии [4]. Пиксель матрицы, являющийся  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодом, представляет собой многослойную структуру состоящую из «широкозонного окна»  $n$ -InP толщиной 2–3 мкм с концентрацией  $(1-2) \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, активного поглощающего слоя  $n$ -In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As толщиной 2,5–3,5 мкм с концентрацией  $(4-7) \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> и подложки  $n^+$ -InP толщиной 350 мкм с концентрацией  $(2-5) \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. При этом  $p$ - $n$ -переход образован локальной диффузией кадмия через маску нитрида кремния. Время диффузии подбирается так, чтобы  $p$ - $n$ -переход проникал в область поглощения In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As на глубину 0,5–1 мкм. В качестве защитного, просветляющего покрытия также использовался нитрид кремния. Омический контакт представляет собой слой золота с подслоем титана. Засветка матрицы осуществляется через подложку InP.

### Результаты и обсуждение

Распределение темнового тока по элементам матрицы, состыкованной с кремниевой БИС считывания при напряжениях обратного смещения на фотодиодах –0,4 В и –0,15 В, представлено на рис. 1. Использовалась БИС считывания со схемой прямой инжекции в ячейке, которая включает емкость накопления  $C1 \cong 0,8$  пФ и согласующий транзистор, работающий в подпороговом режиме и обеспечивающий подачу обратного смещения на фотодиод. Измерялось напряжение на выходах БИС считывания при времени накопления  $T$ , при котором напряжение на емкости накопления лежит в области постоянства коэффициента передачи:

$$K = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{C1}} \cong 0,56, \quad (3)$$

где  $U_{\text{вых}}$  – изменение напряжения на выходе БИС считывания при изменении напряжения на емкости  $DU_{C1}$  [5]. Величина темнового тока  $I_T$  определялась по разряду емкости накопления за время накопления  $T$  и вычислялась из соотношения:

$$I_T = \frac{\Delta U_{\text{вых}} \cdot C1}{T \cdot K}. \quad (4)$$

Среднее значение темнового тока матрицы, состыкованной с БИС считывания, составляет 0,5 пА при напряжении обратного смещения на фотодиодах -0,4 В при комнатной температуре.

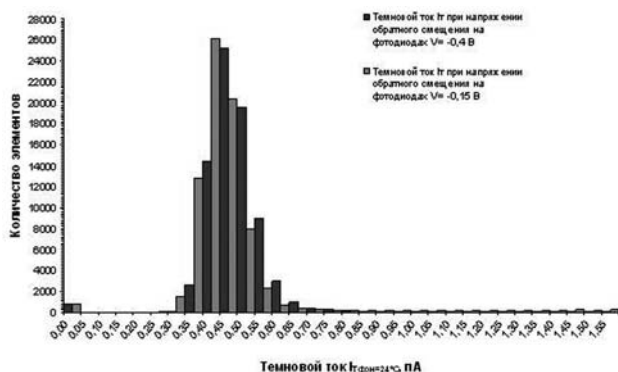


Рис. 1. Гистограммы распределения темнового тока при напряжениях обратного смещения на фотодиодах -0,4 В и -0,15 В.

Вольт-амперные характеристики измерялись на кристалле матрицы с помощью анализатора параметров полупроводников 4145В Hewlett Packard и зондовой установки Karl Suss PSM6. Измерения проводились на кристалле матрицы на отдельно расположенном элементе, по площади равному пикселю матрицы  $5,76 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$ , а также на тестовых элементах большей площади. Измеряемый ток отдельно расположенного элемента матрицы настолько мал, что при обычных рабочих напряжениях смещения на фотодиоде лежит в пределах погрешности измерения. Поэтому для исследования темновых токов были использованы тестовые элементы площадью  $\sim 6,66 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$  (S1) и  $\sim 3,24 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$  (S2), расположенные на периферии пластины, на которой был изготовлен кристалл матрицы. Измеренные вольт-амперные характеристики тестовых элементов различной площади для трех кристаллов показаны на рис. 2.

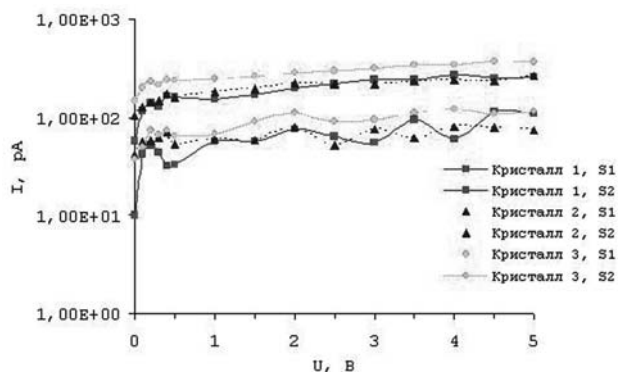


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики тестовых элементов.

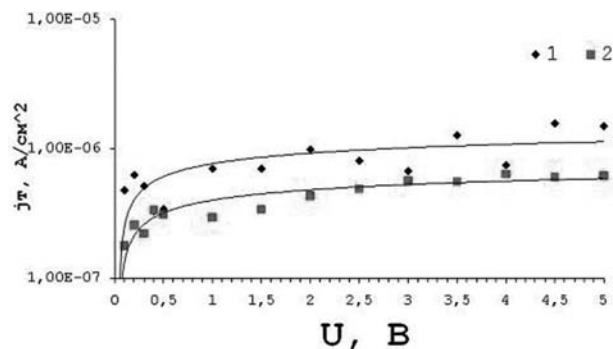


Рис. 3. Зависимость плотности темнового тока от напряжения смещения тестовых элементов, расположенных на кристалле 2: 1 – тестовый элемент площадью S1, 2 – тестовый элемент площадью S2.

Рассчитанная плотность темнового тока тестовых элементов в зависимости от напряжения смещения представлена на рис. 3.

В работе проведено исследование зависимости плотности темнового тока  $J$  от соотношения периметра  $P$  к площади  $S$  тестовых фоточувствительных элементов. Как известно из литературы [2], темновой ток складывается из объемной  $j_B$  и поверхностной  $j_S$  составляющих. Объемный темновой ток пропорционален площади  $p$ - $n$ -перехода, а поверхностный – его периметру:

$$I = j_B S + j_S P \quad (5)$$

$$J = I/S = j_B + j_S P/S \quad (6)$$

Зависимость плотности темнового тока от отношения периметра к площади для тестовых элементов при напряжении 5 В представлена на рис. 4, где наклон линии, отражающей среднее значение, пропорционален плотности темнового тока, зависящей от периметра. Объемная составляющая плотности темнового тока определяется пересечением этой линии с осью  $Y$ .

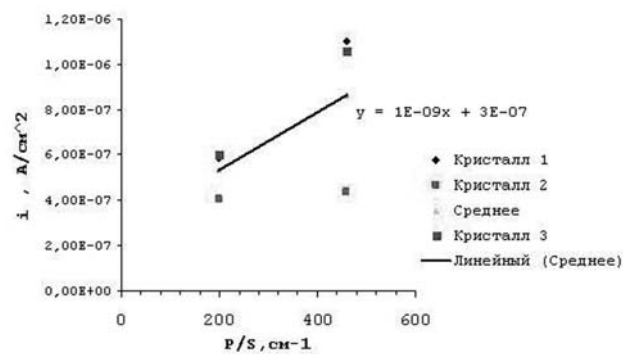


Рис. 4. Зависимость плотности темнового тока для тестовых элементов при напряжении 5 В от  $P/S$ .

Как видно из рис. 4, объемная составляющая плотности темнового тока равна  $j_B = 3 \cdot 10^{-7} \text{ A/cm}^2$  и плотность тока, генерированного на периметре,  $-j_S = 1 \cdot 10^{-9} \text{ A/cm}$ . Объемная составляющая темнового тока определяется свойствами материала эпитаксиальной структуры. Значение поверхностной составляющей плотности темнового тока определяется уровнем технологии изготовления фоточувствительного кристалла. Однако темновой ток, зависящий от периметра, будет доминировать при уменьшении размера пикселя в крупноформатных матрицах. Для маленьких площадок соотношение  $P/S$  увеличивается и влияние тока, генерированного на периметре, усиливается.

Для объемной составляющей при  $U = 5$  В ( $U > kT/q$ ) для случая полного обеднения поглощающего слоя справедливо соотношение:

$$\tau_{эфф} = q \cdot n_i \cdot W / j_B, \quad (7)$$

где  $n_i = 5,4 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> для InGaAs [7],  $W$  – толщина области пространственного заряда,  $j_B$  – объемная составляющая плотности темнового тока.

При напряжении смещения 5 В и концентрации носителей в InGaAs  $7 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> (данные, представленные изготовителем эпитаксиальной пластины) рассчитанная толщина области пространственного заряда (ОПЗ) равняется 3,3 мкм. Тогда эффективное время жизни носителей, согласно формуле (7), составит  $\tau_{эфф} = 95$  мкс.

По сравнению с ранее опубликованными [8] данными для аналогичной эпитаксиальной структуры, выращенной методом жидкофазной эпитаксии, этот результат превосходит опубликованный в три раза, а зарубежные данные колеблются от 190 мкс [9] до 42 мкс [10].

Необходимо отметить, что условия работы тестовых элементов в наших экспериментах отличались от условий работы элементов многоэлементной матрицы. В планарной матрице каждый элемент окружен соседними элементами, которые для него являются своеобразным «охранным кольцом». Поэтому влияние боковой поверхности элементов не сказывается на работе пикселей матрицы, как это имеет место в случае мезаструктурных матриц. При дальнейших исследованиях в топологию матрицы будут включены тестовые матрицы небольшого формата, например, 3x3 пикселя. Это позволит смоделировать окружение элементов в реальных матрицах.

### Заключение

В работе представлены результаты исследования элементов фоточувствительной матрицы на основе гетероэпитаксиальной структуры InGaAs/InP. Приведено распределение темнового тока по элементам матрицы, состыкованной с кремниевым мультиплексором. Исследованы тестовые элементы различной площади. На основании измеренных вольт-амперных характеристик определены составляющие плотности темнового тока при напряжении 5 В, зависящие от объема и периметра элементов. Оценено эффективное время жизни носителей в области объемного заряда  $\tau_{эфф} = 95$  мкс.

Для крупноформатных матриц с малым размером пикселя необходимы как высококачественные материалы, так и особое внимание к технологии изготовления фото-

чувствительной матрицы. Определены методы снижения темнового тока.

1) Оптимизация структуры пикселя матрицы. Исследуемая структура была создана по технологии высокочастотных  $p-i-n$ -фотодиодов, обеспечивающих быстрое действие  $\sim 0,1$  нс при напряжениях смещения 5 В и высокую импульсную токовую монохроматическую чувствительность  $\sim 1$  А/Вт на длине волны 1,55 мкм. Для матричных применений структура пикселя должна быть оптимизирована с учетом достижения малых темновых токов, высокого динамического сопротивления, малых коэффициентов взаимосвязи, достаточно высокой квантовой эффективности и высокой стационарной токовой чувствительности.

2) Отработка технологии контроля и отбраковки по темновым токам пикселей матрицы. В частности, создание малоформатных тестовых матриц (формата 3x3 пикселя) и методик выявления и минимизации количества неработоспособных пикселей.

### Литература

1. Cohen M.J., Ettenberg M.H., Lange M.J., Olsen G.H. // Proc. of SPIE. 1999. V. 3698. P. 453.
2. Техника оптической связи. Фотоприемники. Под ред. У. Тсанга. Перевод с англ. под ред. доктора тех. наук М.А. Трищенко. – М.: Мир, 1988.
3. Андреев Д.С., Чинарёва И.В. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2013630094. Кристалл матрицы  $p-i-n$ -фотодиодов формата 320x256 на основе гетероструктур InGaAs/InP. Зарегистрировано в Гос. реестре топологий интегральных микросхем 2 июля 2013 г.
4. Огнева О.В., Чинарёва И.В., Забенькин О.Н., Мищенкова Т.Н. Патент на изобретение № 2318272. Способ изготовления быстродействующего многоэлементного фотоприёмника на основе эпитаксиальных структур InGaAs/InP. Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений РФ 27 февраля 2008 г.
5. Бурлаков И.Д., Голубков А.В., Дирочка А.И. и др. // Прикладная физика. 2005. № 2. С. 16.
6. Boisvert J., Isshiki T., Sudharsanan R., et al. // Proc. of SPIE. 2008. V. 6940. P. 69400L.
7. Forrest S.R. // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1981. V. QE-17. No. 2. P. 217.
8. Браер М.А., Забенькин О.Н., Кульманов А.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 18. С. 18.
9. Zemel A., Gallant M. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. No. 11. P. 6552.
10. Yuan H., Meixell M., Zhang J., et al. // Proc. of SPIE. 2012. V. 8353. P. 09-6.

## Study of dark currents of focal plane for InGaAs/InP

*D. S. Andreev, A. A. Lopukhin, P. E. Khakuashev, and I. V. Chinareva*

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

*Received November 20, 2013*

*Elements of an InGaAs/InP heteroepitaxial structure based planar focal plane array has been studied. The FPA format is 320x256 pixels with 30  $\mu\text{m}$  pitch. Dark current distributions over the array elements at two values of bias voltage are presented. I-V characteristics of test elements with different areas were studied. Surface and bulk components of dark current density depending on the bulk and perimeter of the elements were determined on the base of the studies. A bulk component of dark current density of  $3 \cdot 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup> at a voltage of 5 V has been obtained. An effective lifetime of charge carriers within the p-n junction space charge region of  $\tau_{\text{eff}} = 95$  ns was evaluated.*

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

*Keywords:* InGaAs, focal plane array, current-voltage characteristics, dark current, dark current density, effective lifetime.

### References

1. M. J. Cohen., M. J. Ettenberg, M. J. Lange, and G. H. Olsen, Proc. SPIE. **3698**, 453 (1999).
2. *Technique of Optical Communications. Photodetectors* (Mir, Moscow, 1988) [in Russian].
3. D. S. Andreev and I. V. Chinareva, RF Patent No. 2013630094 (July 2, 2013).
4. O. V. Ogneva, I. V. Chinareva, et al., RF Patent No. 2318272 (February 27, 2008).
5. I. D. Burlakov, A. V. Golubkov, A. I. Dirochka, et al., Prikladnaya Fizika, No. 2, 16 (2005).
6. J. Boisvert, T. Isshiki, R. Sudharsanan, et al., Proc. SPIE. **6940**, 69400L (2008).
7. S. R. Forrest, IEEE Journal of Quantum Electronics **QE-17**, 217 (1981).
8. M. A. Braer, O. N. Zaben'kin, A. V. Kulymanov, et al., Tech. Phys. Lett. **16**, No. 18, 63 (1990).
9. A. Zeme and M. Gallant, J. Appl. Phys. **64**, 6552 (1988).
10. H. Yuan, M. Meixell, J. Zhang, et al., Proc. SPIE. **8353**, 09-6 (2012).