

УДК 621.383.4/5

## Быстродействующие матрицы фотодиодов на основе двойных гетероструктур InGaAs–InGaAlAs–InAlAs и их характеристики

Н. И. Яковлева, К. О. Болтарь

*Для изготовления быстродействующих матриц фоточувствительных элементов с малыми темновыми токами использовались двойные гетероструктуры на основе соединений InGaAs–InGaAlAs–InAlAs на InP-подложках. Они включали поглощающий узкозонный слой InGaAs, градиентный слой InGaAlAs и широкозонный слой буферный слой InAlAs. Проведены измерения и сравнение темновых токов в одинарных гетероструктурах InGaAs–InP (с широкозонным слоем InP) и в двойных гетероструктурах InGaAs–InGaAlAs–InAlAs (с широкозонным барьерным слоем InAlAs), выявлено уменьшение токов генерации-рекомбинации и диффузии на два порядка в структурах InGaAs–InGaAlAs–InAlAs. Проведено приближение измеренных и теоретических ВАХ-методом подгонки параметров, определена рабочая температура, необходимая для оптимальной работы матриц фотодиодов на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs, которая лежит в пределах 260—280 К.*

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw, 42.25.Gy, 78.20.Ci

*Ключевые слова:* фотоприемные устройства, двойные гетероструктуры InGaAs–InGaAlAs–InAlAs, вольтамперная характеристика, ВАХ, темновой ток.

### Введение

Быстродействующие матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) на основе тройных соединений InGaAs широко используются в оптико-электронных системах оптической связи, лазерной локации, приборах ночного видения и другой аппаратуре [1, 2]. Они формируются ионным мезатравлением в гетероструктурах на основе тройных соединений InGaAs, выращенных на согласованных по кристаллической структуре оптически прозрачных подложках InP. Для изготовления на их основе фоточувствительных приборов огромное значение имеет достижение минимальных темновых токов у отдельных фотодиодов матрицы.

Несмотря на успехи в технологии выращивания бездефектных эпитаксиальных слоев  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  на подложках InP методом МОС-гидридной эпитаксии, проблема получения малых темновых токов в МФЧЭ, изготовленных по меза-технологии, стоит достаточно остро. В настоящее

время для уменьшения темновых токов используются ненапряженные поглощающие эпитаксиальные слои  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  определенной толщины с минимальным количеством дислокаций и контролируемым уровнем легирования. Тем не менее, рекомбинация на поверхности мезафотодиодов и на границе слоя поглощения вызывают увеличение темновых токов, что приводит к уменьшению фотоэлектрических параметров.

Для изготовления быстродействующих матриц фоточувствительных элементов с малыми темновыми токами возможно использование двойных гетероструктур [3] на основе соединений InGaAs–InGaAlAs–InAlAs на InP-подложках. Помимо поглощающего узкозонного слоя InGaAs они включают градиентный слой InGaAlAs и широкозонный буферный слой InAlAs.

Целью данной работы являлось проведение расчетов темновых токов  $p-i-n$ -фотодиодов в одинарных гетероструктурах InGaAs–InP (с широкозонным слоем InP) и в двойных гетероструктурах InGaAs–InGaAlAs–InAlAs в интересах оценки вкладов различных составляющих в темновой ток фотодиодов, что позволяет дать рекомендации по дальнейшему усовершенствованию гетероэпитаксиальных структур на основе InGaAs.

### Гетероэпитаксиальные структуры на основе InGaAs

Гетероэпитаксиальные структуры на основе InGaAs выращивались методом мосгидридной

Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ<sup>1</sup>.  
Болтарь Константин Олегович, начальник НТК<sup>1</sup>, профессор<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>АО «НПО «Орион».

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

Тел. 8 (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 18 мая 2015 г.

© Яковлева Н. И., Болтарь К. О., 2015

эпитаксии на подложках InP в ОАО «НИИ «Полнос» им. М. Ф. Стельмаха. Одиная гетероструктура InP–InGaAs–InP  $N-i-P$ -типа включала широкозонный легированный Si слой InP  $n$ -типа проводимости толщиной  $\sim 0,2$  мкм и концентрацией  $N = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; поглощающий узкозонный слой  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$   $i$ -типа проводимости толщиной  $\sim 2,0$  мкм; уменьшающий токи туннелирования широкозонный слой InP толщиной  $\sim 0,5$  мкм и верхний высоколегированный Zn слой InGaAs  $p^+$ -типа с концентрацией  $P = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , который обеспечивал омический  $p$ -контакт. Фотодиоды, изготовленные на основе данной структуры, имели повышенные на два порядка ( $\sim 30$  пА) темновые токи по сравнению с планарными классическими фотодиодами [4], что стимулировало работы по усовершенствованию гетероструктуры InGaAs.

Для уменьшения темновых токов  $p-i-n$ -фотодиодов была выбрана двойная гетероструктура InGaAs–InGaAlAs–InAlAs. Структура состояла из оптически прозрачной подложки InP  $n$ -типа проводимости, на которой выращивался буферный слой InP  $n$ -типа проводимости с концентрацией  $N = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  для получения омического  $n$ -контакта. На буферном слое располагался поглощающий слой InGaAs толщиной  $\sim 2,0$  мкм  $n$ -типа проводимости с концентрацией  $n = 2,5 \cdot 10^{16}$ , далее формировался тонкий ( $\sim 50$  нм) слой AlInGaAs  $n$ -типа с градиентным изменением энергии запрещенной зоны для согласования кристаллических решеток поглощающего слоя  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  и широкозонного нелегированного слоя InAlAs. Широкозонный нелегированный слой InAlAs располагался в области  $p-n$ -перехода. Следом за ним формировался верхний высоколегированный слой InGaAs  $p^+$ -типа с концентрацией  $P = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , к которому изготавливался омический  $p$ -контакт. Таким образом, архитектура прибора представляла собой двойную гетероструктуру  $N-i-I-P$ -типа.

В предложенной гетероструктуре широкозонный слой InAlAs располагался в области  $p-n$ -перехода, что позволило уменьшить темновой ток за счет подавления генерационно-рекомбинационной и туннельной составляющих. Дополнительно, вследствие широкозонности, данный слой являлся также барьером для диффузионного тока. Градиентный слой InAlGaAs  $i$ -типа проводимости формировался для согласования кристаллических решеток поглощающего слоя InGaAs и широкозонного слоя InAlAs и уменьшения неоднородностей зонной диаграммы структуры InGaAs–InGaAlAs–InAlAs.

## Результаты и обсуждение

Проведены измерения темновых токов фотодиодов в матрицах ФЧЭ формата  $320 \times 256$  элементов с шагом 30 мкм и размером ФЧЭ  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>, изготовленных по мезотехнологии в одинарной и двойной гетероэпитаксиальных структурах с поглощающим слоем  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ .

Для измеренных структур проводилось моделирование вольтамперных (ВАХ) характеристик. При этом плотность темнового тока рассчитывалась как сумма отдельных токовых составляющих [5], которые включали: диффузионный ток  $J_{dif}$  [6], генерационно-рекомбинационный ток  $J_{g-r}$  [7], ток туннелирования через ловушки в запрещенной зоне  $J_{TAT}$ , ток туннелирования зона–зона  $J_{BBT}$  [8, 9], токи поверхностной утечки  $J_s$  и ток шунтирующей утечки  $J_{sh}$ :

$$J_{\Sigma} = J_{dif} + J_{g-r} + J_{TAT} + J_{BBT} + J_s + J_{sh}.$$

Входящие в формулу  $J_{\Sigma}$  значения параметров и константы, характерные для конкретных фотодиодов, были определены методом подгонки экспериментально измеренных ВАХ при температуре  $T = 300$  К. По известным параметрам рассчитывались входящие в формулу составляющие темнового тока при различных напряжениях смещения и температурах.

На рис. 1 показаны темновые токи в зависимости от напряжения (в отрицательной области смещений) при  $T = 300$  К для отдельного фотодиода матрицы (образец № 01), изготовленного в одинарной гетероструктуре InP–InGaAs–InP  $N-i-P$  типа.

Из рис. 1 видно, что в одинарной структуре гетероструктуре InP–InGaAs–InP  $N-i-P$ -типа определяющим в диапазоне отрицательных напряжений смещения являлся ток генерации-рекомбинации. Составляющая диффузионного тока была на порядок меньше, а токи туннелирования незначительны.

На рис. 2 представлена температурная зависимость суммарного темнового тока, а также температурные зависимости различных составляющих темнового тока при рабочем напряжении смещения  $U = -5$  В для отдельного фотодиода матрицы (образец № 01), изготовленного в одинарной гетероструктуре InP–InGaAs–InP  $N-i-P$ -типа.

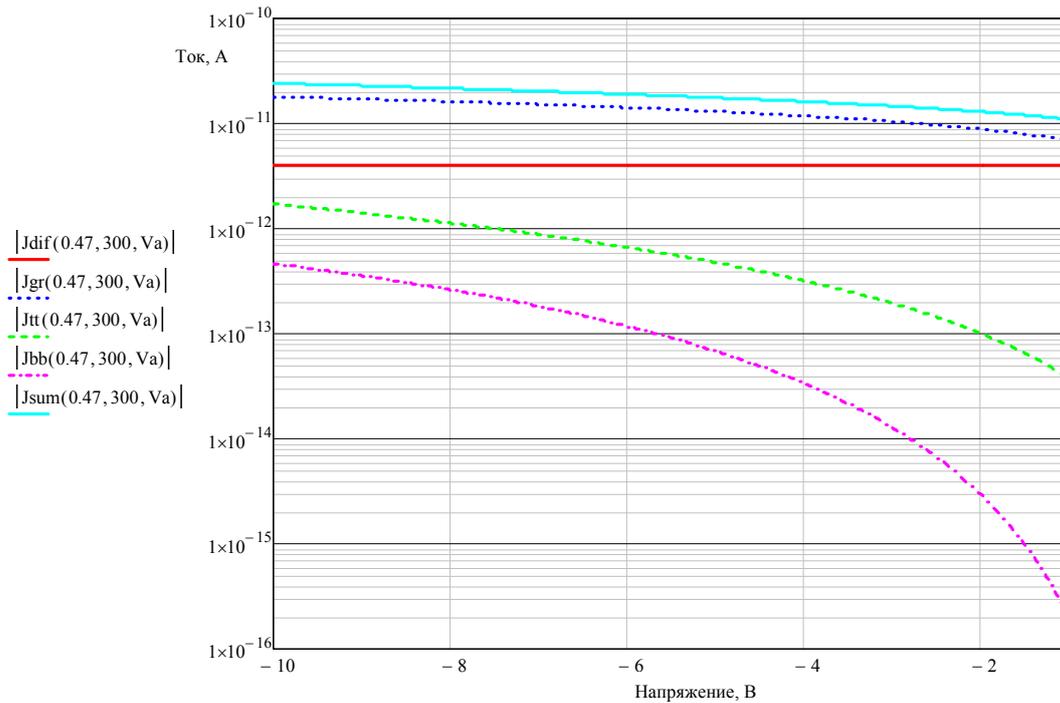


Рис. 1. Составляющие темнового тока в зависимости от напряжения смещения при рабочей температуре  $T = 300$  K для отдельного фотодиода (образец № 01) размером  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>, изготовленного в одинарной гетероструктуре InP–InGaAs–InP N–i–P-типа меза-травлением;  $J_{dif}$  — диффузионная составляющая;  $J_{gr}$  — генерационно-рекомбинационная составляющая;  $J_{tt}$  — ток туннелирования через уровни ловушек;  $J_{bb}$  — ток туннелирования зона-зона;  $J_{sum}$  — суммарный темновой ток

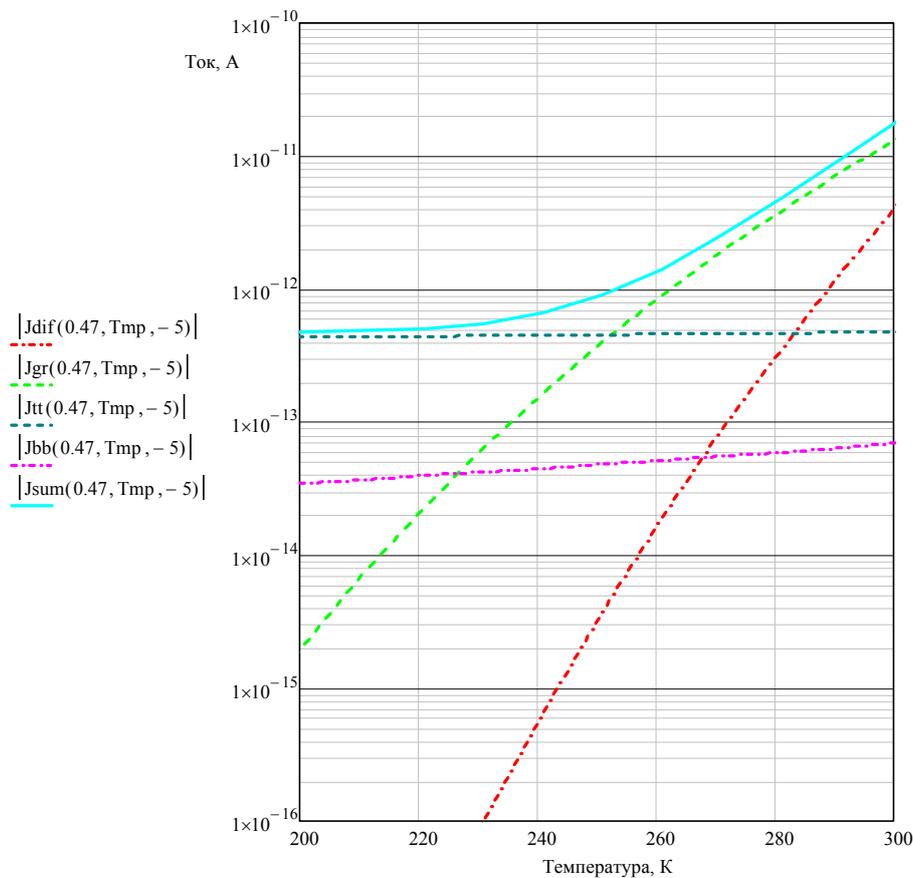


Рис. 2. Суммарный темновой ток и различные составляющие темнового тока в зависимости от температуры при напряжении смещения  $U = -5$  В для отдельного фотодиода (образец № 01) размером  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>, изготовленного в одинарной гетероструктуре InP–InGaAs–InP N–i–P-типа меза-травлением.  $J_{dif}$  — диффузионная составляющая;  $J_{gr}$  — генерационно-рекомбинационная составляющая;  $J_{tt}$  — ток туннелирования через уровни ловушек;  $J_{bb}$  — ток туннелирования зона-зона;  $J_{sum}$  — суммарная ВАХ

Из рис. 1 и 2 следует, что для образца № 01, изготовленного в одинарной гетероструктуре InP–InGaAs–InP  $N-i-P$ -типа, при небольших напряжениях смещения в области температур 250–300 К основной вклад в суммарный ток фотодиода вносят токи генерации-рекомбинации. Токи туннелирования влияют в области 200–280 К, диффузионный ток оказывает влияние в области 280–300 К. В области температур 200–250 К основную роль играют токи туннелирования.

На рис. 3 показаны темновые токи в зависимости от напряжения (в отрицательной области смещений) при  $T = 300$  К в двойной гетероструктуре InGaAs–InGaAlAs–InAlAs  $N-i-I-P^+$ -типа.

Из рис. 3 видно, что у образца № 02, изготовленного в двойной гетероструктуре InGaAs–InGaAlAs–InAlAs  $N-i-I-P^+$ -типа, в диапазоне рабочих смещений 0 В – минус 6 В основной вклад вносит ток генерации-рекомбинации; ток туннелирования через уровни в запрещенной зоне становится

заметным при напряжениях смещения от минус 6 В и более.

На рис. 4 представлена температурная зависимость суммарного темнового тока, а также температурные зависимости различных составляющих темнового тока при рабочем напряжении смещения ( $U = -5,0$  В) для отдельного фотодиода матрицы (образец № 02), изготовленного в двойной гетероструктуре InGaAs–InGaAlAs–InAlAs  $N-i-I-P^+$ -типа.

Из рис. 4 следует, что для образца № 02, изготовленного в двойной гетероструктуре InGaAs–InGaAlAs–InAlAs  $N-i-I-P^+$ -типа, в диапазоне рабочих температур 270–300 К преобладают токи генерации-рекомбинации и туннелирования через уровни ловушек в запрещенной зоне. В области рабочих температур 200–270 К основной вклад в суммарный ток фотодиода вносят токи туннелирования. Диффузионные токи и ток шунтирующей утечки незначительны.

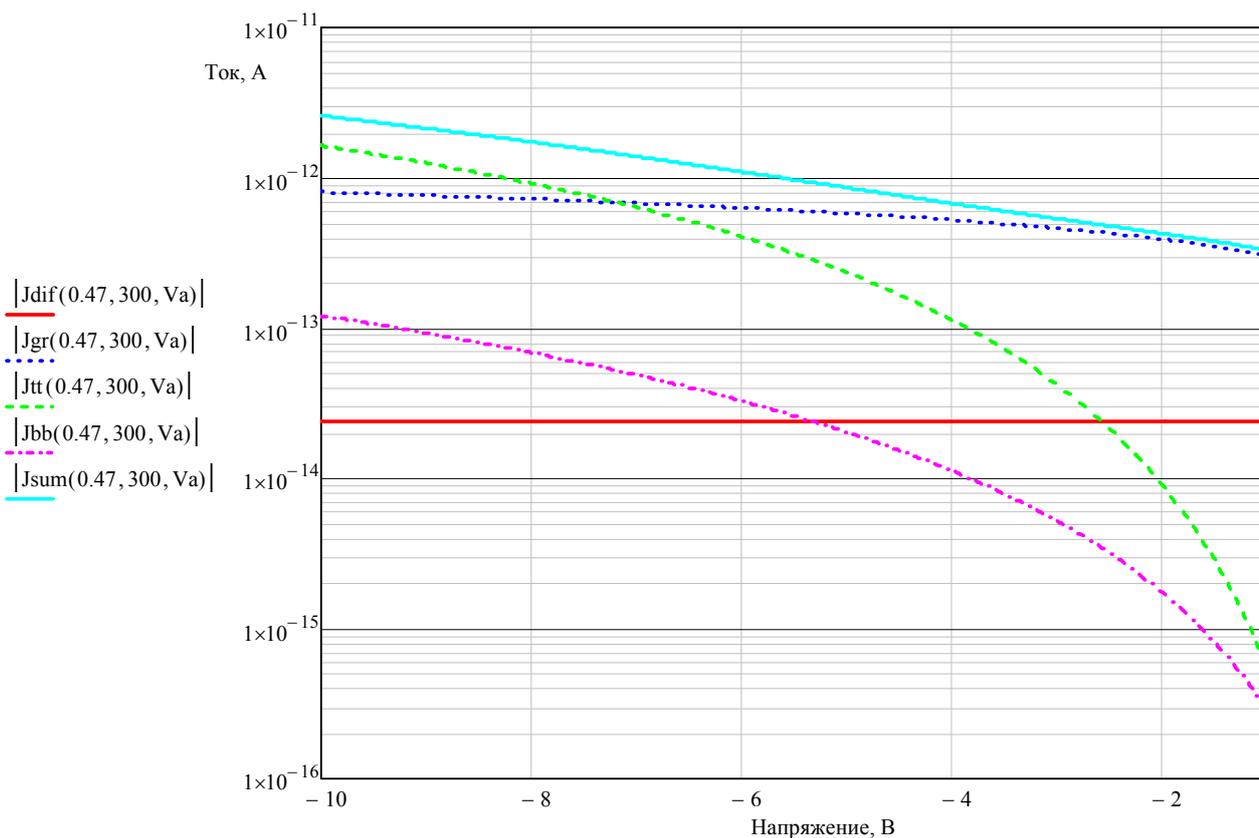


Рис. 3. Составляющие темнового тока в зависимости от напряжения смещения при рабочей температуре  $T = 300$  К для отдельного фотодиода (образец № 02) размером  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>, изготовленного в двойной гетероструктуре InGaAs–InGaAlAs–InAlAs  $N-i-I-P^+$ -типа меза-травлением;  $J_{dif}$  — диффузионная составляющая;  $J_{gr}$  — генерационно-рекомбинационная составляющая;  $J_{tt}$  — ток туннелирования через уровни ловушек;  $J_{bb}$  — ток туннелирования зона-зона;  $J_{sum}$  — суммарная ВАХ

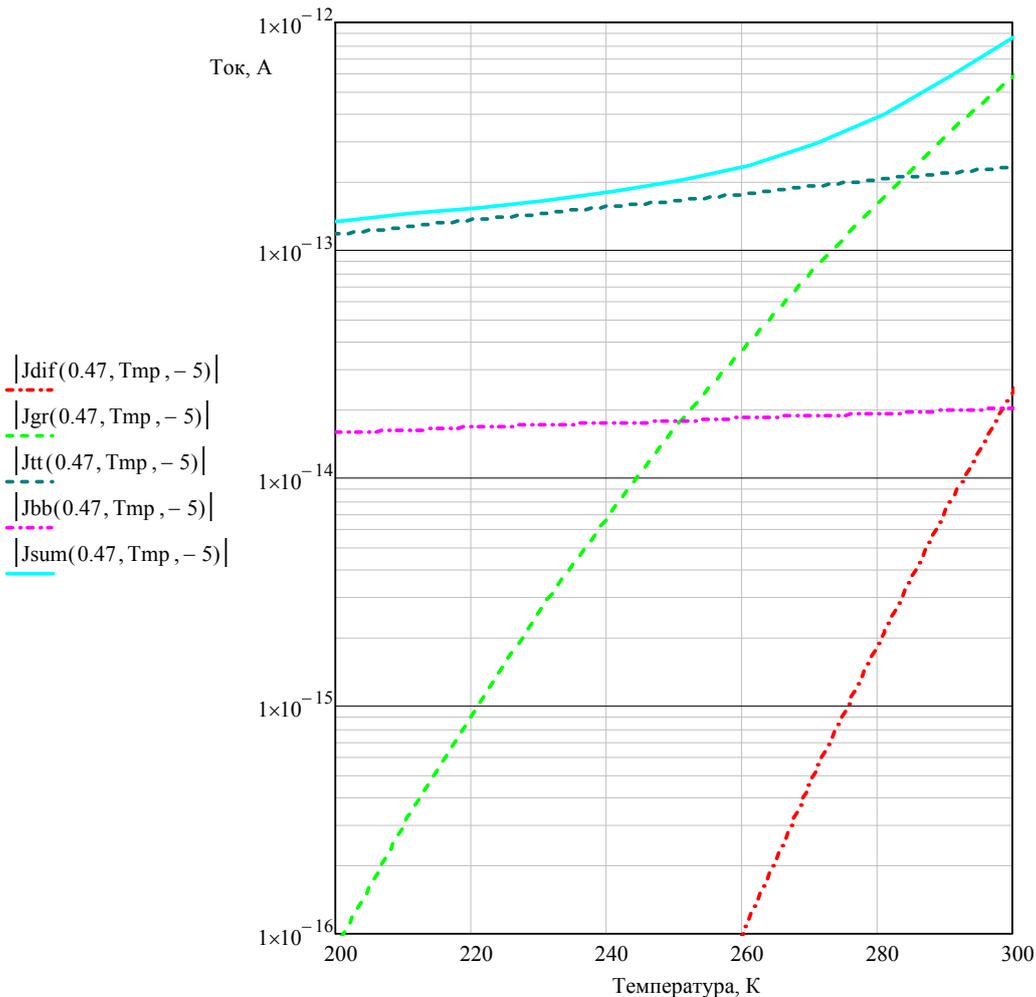


Рис. 4. Суммарный темновой ток и различные составляющие темнового тока в зависимости от температуры при напряжении смещения  $U = -1$  В для отдельного фотодиода (образец № 02) размером  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>, изготовленного в двойной гетероструктуре InGaAs–InGaAlAs–InAlAs N–i–I–P<sup>+</sup>-типа меза-травлением;  $J_{dif}$  — диффузионная составляющая;  $J_{gr}$  — генерационно-рекомбинационная составляющая;  $J_{tt}$  — ток туннелирования через уровни ловушек;  $J_{bb}$  — ток туннелирования зона-зона;  $J_{sum}$  — суммарная ВАХ

Дополнительное уменьшение токов туннелирования в двойных гетероструктурах можно обеспечить за счет уменьшения собственных дефектов.

Сравнив результаты ВАХ для фотодиодов образца № 01 и № 02, можно сделать вывод, что использование двойной гетероструктуры InGaAs–InGaAlAs–InAlAs позволяет добиться уменьшения токов генерации-рекомбинации и диффузии на два порядка по сравнению с одинарной гетероструктурой InP–InGaAs–InP.

Для получения высоких фотоэлектрических параметров исследованные структуры целесообразно охлаждать с использованием термоэлектрического охладителя. Результаты математического моделирования позволили определить оптимальную рабочую температуру охлаждения, при которой обеспечиваются максимально возможные параметры. Для одинарной гетероструктуры InP–InGaAs–InP она составила  $\sim 250$  К, а для двойной гетероструктуры InGaAs–InGaAlAs–InAlAs она

равна  $\sim 280$  К. Охлаждение ниже оптимальной температуры не приводит к существенному изменению фотоэлектрических параметров.

Дополнительно рассчитаны скорость поверхностной рекомбинации  $S_p$ , входящая в формулу диффузионного тока, и эффективное время жизни  $\tau_{eff}$ , входящее в формулу генерационно-рекомбинационный ток. Значения этих данных приведены в таблице.

Таблица

| Параметр  | Образец № 01        | Образец № 02         |
|---|---------------------|----------------------|
| Скорость поверхностной рекомбинации, $S_p$ , см <sup>2</sup> /с | $4,1 \cdot 10^5$    | $3,1 \cdot 10^3$     |
| Эффективное время жизни, $\tau_{eff}$ , с                       | $2,1 \cdot 10^{-6}$ | $6,04 \cdot 10^{-5}$ |

Высокое значение скорости поверхностной рекомбинации и малое эффективное время жизни носителей заряда у образца № 01, изготовленного

в одинарной гетероструктуре InP–InGaAs–InP  $N-i-P$ -типа, указывают на недостаточную эффективность защиты боковых граней мезаэлементов МФЧЭ диэлектрическим слоем. Существенное уменьшение поверхностной рекомбинации и увеличение эффективного времени жизни носителей заряда у образца № 02, изготовленного в двойной гетероструктуре InGaAs–InGaAlAs–InAlAs  $N-i-I-P^+$ -типа, свидетельствует об эффективной пассивации области поглощения широкозонным барьерным слоем InAlAs.

### Заключение

Измерения и расчеты отдельных составляющих темнового тока фотодиодов, изготовленных мезатравлением в двойных гетероструктурах InGaAs–InGaAlAs–InAlAs  $N-i-I-P^+$ -типа, показали, что при небольших напряжениях смещения ( $U = 0 \div -5$  В) преобладает ток генерации-рекомбинации, а в области низких температур 200—250 К основной вклад в суммарный ток фотодиода вносят токи туннелирования. Проведено приближение измеренных и теоретических ВАХ методом подгонки параметров, определена скорость поверхностной рекомбинации на границе слоя поглощения, которая для двойных гетероструктур оказалась на два порядка меньше, чем в одинарных  $p-i-n$ -структурах. Определена оптимальная рабочая температура охлаждения, которая для одинарных гетероструктур InP–InGaAs–InP составляет 250—260 К, а для двойных гетероструктур ~280 К.

Таким образом, применение двойных гетероструктур InGaAs–InGaAlAs–InAlAs  $N-i-I-P^+$ -типа весьма перспективно при изготовлении фотоприемных устройств на основе InGaAs с высокими фотоэлектрическими параметрами.

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. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники. — М.: Физматкнига, 2010.
3. Jae-Hyung Jang, Student Member, Gabriel Cueva, et al. // Jour. of Lightwave Technology. 2002. V. 20. No. 3. P. 507.
4. Болтарь К. О., Чинарева И. В., Лопухин А. А. и др. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 10.
5. Onat Bora M., Jiang Xudong, and Itzler Mark / LEOS Annual Meeting Conference Proceedings. LEOS'09 IEEE, DOI 10.1109/LEOS.2009.5343289.
6. Griggs Melissa J., Kayes Brendan M., and Atwater Harry A. // Proc. SPIE. V. 6339. P. 63390D-1.
7. Onat Bora M., Huang Wei, Masaun Navneet, et al. // Proc. SPIE. 2007. V. 6542. P. 65420L1.
8. Williams G. M., Compton M., Ramirez D. A., et al. // IEEE of the Electron Devices Society (J-EDS). 2013. Issue 2. P. 54. DOI 10/1109/JEDS.2013.2258072.
9. Forrest S. R. // IEEE J Quantum Electron. 1981. V. 17. P. 217.

## High-speed FPAs based on InGaAs–InGaAlAs–InAlAs double heterojunctions and their current characteristics

*N. I. Iakovleva<sup>1</sup> and K. O. Boltar<sup>1,2</sup>*

<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 May 18, 2015

*InGaAs–InGaAlAs–InAlAs double heterojunctions on the InP substrates were used to fabricate high-speed FPAs with low dark currents. They included InGaAs narrow gap absorption layer, InGaAlAs graded band gap layer, and InAlAs large bandgap layer. The dark current characteristics have been measured and compared in single InGaAs–InP and double InGaAs–InGaAlAs–InAlAs heterojunction photodiodes. It was shown, that in double InGaAs–InGaAlAs–InAlAs heterojunction photodiodes the dark current is more than a factor of 100 smaller than in the single InGaAs–InP heterojunction*

*photodiodes. Numerical simulation of volt-ampere characteristics for these devices allowed to determine the optimum working temperature, which was in the range of 250—280 K.*

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw, 42.25.Gy, 78.20.Ci

*Keywords:* photoreceivers, double heterojunctions, InGaAs–InGaAlAs–InAlAs, volt-ampere characteristic, dark current.

#### REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
2. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *The Current Status and Main-Line Trackage for Development of Photoelectronics* (Fizmatkniga, Moscow, 2010) [in Russian].
3. Jae-Hyung Jang, Student Member, Gabriel Cueva, et al., *Jour. of Lightwave Technology* **20**, 507 (2002).
4. K. O. Boltar, I. V. Chinareva, A. A. Lopukhin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 10 (2013).
5. Bora M. Onat, Xudong Jiang, and Mark Itzler, in *LEOS Annual Meeting Conference Proceedings. LEOS'09 IEEE*, (DOI 10.1109/LEOS.2009.5343289).
6. Melissa J. Griggs, Brendan M. Kayes, and Harry A. Atwater, *Proc. SPIE* **6339**, 63390D-1.
7. Bora M Onat., Wei Huang, Navneet Masaun, et al., *Proc. SPIE* **6542**, 65420L1 (2007).
8. G. M. Williams, M. Compton, D. A. Ramirez, et al., *IEEE of the Electron Devices Society (J-EDS) Issue 2*, 54 (2013).
9. S. R. Forrest, *IEEE J Quantum Electron.* **17**, 217 (1981).