

УДК 621.383.4

## Исследование фотоэлектрических параметров фотоприемного модуля формата 320×256 на основе InGaAs

Д. Л. Балиев, П. С. Лазарев, К. О. Болтарь

*Исследованы темновые токи фотодиодов и основные фотоэлектрические параметры фотоэлектронных модулей коротковолнового ИК-диапазона (0,9—1,7 мкм) формата 320×256, выполненных с шагом 30 мкм на основе эпитаксиальных гетероструктур InGaAs на подложке InP и изготовленных по планарной и меза-технологии.*

PACS: 07.57.Kp, 85.60.Dw, 85.60.Gz

**Ключевые слова:** ФЭМ, темновой ток, обнаружительная способность, вольтовая чувствительность, меза-структура, InGaAs, коротковолновый ИК.

### Введение

Использование инфракрасных матричных фотоэлектронных модулей (ФЭМ) на основе  $p-i-n$ -фотодиодов, изготовленных в структурах InGaAs, перспективно для решения ряда важных задач, например, таких как лазерная локация, приборы ночного видения [1—11]. Преимущество ФЭМ коротковолнового ИК-диапазона на основе фотодиодов в гетероэпитаксиальной структуре InGaAs состоит в возможности работы при температурах, близких к комнатной. Для охлаждения и термостабилизации возможно использование термоэлектрических устройств, что существенно улучшает характеристики ФЭМ и повышает устойчивость к рабочей температуре окружающей среды. Использование термоэлектрического охлаждения (ТЭО) существенно снижает массогабаритные характеристики и цену по сравнению с ФЭМ среднего и дальнего ИК-диапазонов, которые охлаждаются криогенными системами.

ФЭМ формата 320×256 на спектральный диапазон 0,9—1,7 мкм разработан и изготовлен в ОАО «НПО «Орион». ФЭМ выполнен с шагом 30 мкм на основе эпитаксиальных гетероструктур InGaAs на подложке InP и изготовлен по планарной и меза-технологии.

В состав ФЭМ входит БИС считывания с трансимпедансным усилителем в ячейке. Использование трансимпедансного усилителя дает воз-

можность реализовать эффективное накопление слабых сигналов. Использование блока электронного сопряжения сигналов с цифровым выходом позволяет избежать излишних внешних навесок и полностью оптимизировать соотношение сигнал/шум фотоприемника.

Целью данной работы являлось исследование темновых токов фотодиодов и основных фотоэлектрических параметров указанных ФЭМ.

### Исследование темнового тока

Проведены исследования темнового тока ФЭМ на образцах с планарной и мезаструктурой. Измерены зависимости выходного сигнала ФЭМ с закрытым входным окном от времени накопления при двух температурах, а именно комнатной (20 °С) и с включенным ТЭО (-25 °С). Из измеренных зависимостей выходного сигнала от времени накопления можно вычислить темновой ток по формуле:

$$I = (U_{\text{вых}} \cdot C) / \tau_{\text{нак}}$$

где  $C$  — емкость ячейки БИС считывания,  $U_{\text{вых}}$  — сигнал с ФЭМ,  $\tau_{\text{нак}}$  — время накопления.

Результаты измерения темнового тока для планарной и меза-структур представлены в табл. 1.

Таблица 1

	20 °С	-25 °С	Ток (20 °С)/ Ток (-25 °С)
Планарная структура	340 фА	15 фА	~20
Меза-структура	20,58 пА	150 фА	~140

Использование ТЭО привело к уменьшению темнового тока планарной структуры в ~20 раз, а

Балиев Дмитрий Леонидович, инженер.  
Лазарев Павел Сергеевич, вед. инженер.  
Болтарь Константин Олегович, начальник НТК.  
ОАО «НПО «Орион».  
Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.  
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья в редакцию 13 августа 2014 г.

© Балиев Д. Л., Лазарев П. С., Болтарь К. О., 2014

темнового тока меза-структуры — в ~140 раз. Это дает возможность реализовать большее время накопления и получить лучшие значения основных параметров ФЭМ.

Темновые токи меза-структуры выше соответствующих токов в планарной структуре, и мы можем ожидать фотоэлектрические параметры охлаждаемой меза-структуры на уровне параметров планарной структуры при комнатной температуре.

Рассмотрим выражение для темнового тока:

$$J = J_s \left( \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right)$$

Он определяется двумя составляющими, а именно: диффузионный ток в нейтральной области и генерационно-рекомбинационный ток в обедненной области:

$$J_s = q \sqrt{\frac{D_p n_i^2}{\tau_p N_D} + \frac{qWn_i}{\tau}}$$

В *p-i-n*-фотодиодах преобладает генерационно-рекомбинационный ток, и можно считать, что  $J_s \sim n_i$ . В случае, если темновой ток определяется не генерационно-рекомбинационным током в обедненной области фотодиода, то имеем другую зависимость:  $J_s \sim n_i^2$ .

Концентрация носителей имеет зависимость от температуры:

$$n_i \sim \exp\left(\frac{qE}{2kT}\right)$$

Если преобладает генерационно-рекомбинационный ток, то можно получить следующее соотношение:

$$I(20\text{ }^\circ\text{C}) / I(-25\text{ }^\circ\text{C}) \approx 15.$$

Это значение примерно соответствует изменениям температурной зависимости темновых токов в планарной структуре.

Измеренная температурная зависимость темновых токов в меза-структуре существенно более резкая, что не соответствует генерационно-рекомбинационному характеру тока в обедненной области фотодиода. Этот избыточный ток может быть объяснен утечками через боковую поверхность меза-структуры.

Исследованные нами зависимости темнового тока меза-структур от периметра ФЧЭ показали, что при размере меньше 40 мкм преобладают поверхностные токи.

Из температурных зависимостей темнового тока можно сделать выводы:

– В планарной структуре темновой ток обусловлен генерационно-рекомбинационным током в обедненной области фотодиода.

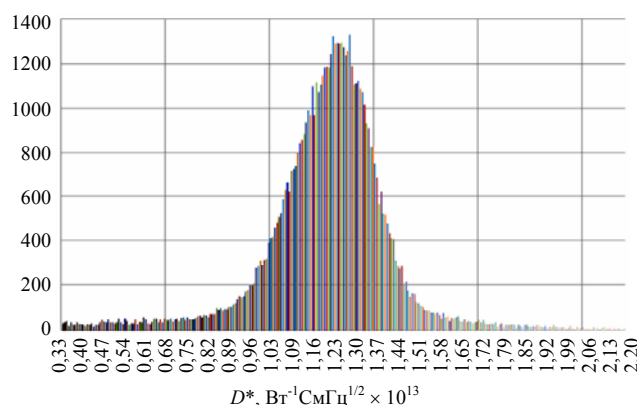
– В меза-структуре имеется избыточный темновой ток, обусловленный утечками через боковую поверхность меза-структуры.

### Исследование основных параметров ФЭМ

Проведены исследования планарного образца ФЭМ для двух температур: 20 °С и -25 °С. Численные результаты измерений приведены в табл. 2, а на рисунке приведена гистограмма распределения  $D^*$  планарной структуры при температуре -25 °С.

Таблица 2

Тип	Планарная		Меза
	20 °С	-25 °С	-25 °С
$\tau_{int}$ , мс	20	166	20
Ср. $D^*$ , Вт <sup>-1</sup> смГц <sup>1/2</sup>	$2,9 \times 10^{12}$	$1,24 \times 10^{13}$	$2,22 \times 10^{12}$
$\delta D^*$ , %	9,1	11,8	—
Ср. Su, В/Вт	$1,5 \times 10^{11}$	$2,4 \times 10^{12}$	$2,5 \times 10^{12}$
$\delta Su$ , %	7,3	8,8	—



Гистограмма распределения обнаружительной способности  $D^*$  планарной структуры при -25 °С

Результаты исследования показали высокий уровень фотоэлектрических характеристик ФЭМ ( $D^* \approx 10^{13}$  Вт<sup>-1</sup>смГц<sup>1/2</sup>). Мы можем наблюдать достаточно симметричное распределение без особых аномалий. Необходимо заметить, что на гистограмме не отображены дефектные элементы (~3 %, однако в более новых структурах удалось понизить дефектность до 0,9 %).

Для образца ФЭМ на основе меза-структуры проведены исследования при температуре -25 °С. Результаты измерений приведены в табл. 2. Результаты исследования показали пониженный уровень фотоэлектрических характеристик ФЭМ по сравнению с планарной структурой, что обуславливается дополнительными поверхностными темновыми токами, но дефектность образца на меза-структуре гораздо ниже (< 1 %).

### Заключение

Проведены исследования образцов ФЭМ на основе эпитаксиальных гетероструктур InGaAs на подложке InP с использованием планарной и меза-структуры. Получены температурные зависимости темновых токов в планарной и меза-структуре InGaAs, показавшие преобладание генерационно-рекомбинационного тока в обедненной области фотодиода темнового тока в планарной структуре и нехарактерного для  $p-i-n$ -фотодиода темнового тока, пропорционального периметру структуры в меза-структуре.

Проведено исследование фотоэлектрических параметров ФЭМ на основе InGaAs с использованием планарной и меза-структуры. Полученные данные показали высокий уровень фотоэлектрических параметров ФЭМ на основе планарной структуры. Удельная обнаружительная способность ФЭМ находится на уровне лучших мировых образцов ( $D^* > 10^{13}$  Вт<sup>-1</sup>см<sup>2</sup>Гц<sup>1/2</sup>). Дефектность на таких структурах находится в диапазоне 0,9—3 %. В меза-структуре получена низкая дефектность (< 1 %), однако поверхностные темновые токи в них существенно ухудшают параметры, и очевидно, что в дальнейшем необходимо принять дополнительные меры по уменьшению этих токов.

*Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9.*

### Литература

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2005.
2. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фоторезисторы и фотоприемные устройства. — М.: Физматкнига, 2012.
3. Болтарь К. О., Чинарёва И. В., Лопухин А. А. и др. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 10.
4. Андреев Д. С., Болтарь К. О., Власов П. В. и др. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 47.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — Мир, 1984.
6. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Корнеева М. Д. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 50.
7. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 64.
8. Зайцев А. А., Хромов С. С., Болтарь К. О. и др. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 97.
9. Балиев Д. Л., Лазарев П. С., Болтарь К. О. / Труды XXIII международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М.: ОАО «НПО «Орион». 2014. С. 67—69.
10. Патрашин А. И., Балиев Д. Л., Болтарь К. О. и др. / Труды XXIII международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М.: ОАО «НПО «Орион». 2014. С. 297, 298.
11. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.

## Research of main photoelectric characteristics of the 320×256 InGaAs FPA's

*D. L. Baliev, P. S. Lazarev, and K. O. Boltar*

Orion Research-and-Production Association  
46/2 Entuziastov shosse, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

*Received August 13, 2014*

***In this research, dark current and main photoelectric characteristics: detectivity ( $D^*$ ) and voltage sensitivity ( $S_v$ ) and their dispersion have been investigated. The 320×256 FPA's are made of InGaAs/InP photodiodes with 30  $\mu\text{m}$  pitch for SWIR (0.9—1.7  $\mu\text{m}$ ). Two types of structures were used — planar and mesa structures, and their characteristics were compared.***

PACS: 07.57.Kp, 85.60.Dw, 85.60.Gz

**Keywords:** FPA, dark current, detectivity, voltage sensitivity, mesa structure, InGaAs, SWIR.

**References**

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Base*. (Fizmatkniga, Moscow, 2005) [in Russian].
2. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photoresistors and Photodetectors*. (Fizmatkniga, Moscow, 2012) [in Russian].
3. K. O. Boltar, I. V. Chinareva, A. A. Lopukhin, et al. *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 10 (2013).
4. D. S. Andreev, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 47 (2014).
5. S. M. Sze and K. Ng Kwok, *Physics of Semiconductors Devices*. - Wiley, 2007.
6. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, M. D. Korneeva, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 50 (2014).
7. A. I. Patrashin and I. D. Burlakov, *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 64 (2013).
8. A. A. Zaitsev, S. S. Khromov, K. O. Boltar, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 97 (2011).
9. D. L. Baliev, P. S. Lazarev, and K. O. Boltar., in *Proc. XXIII Intern. Conf. Photoelectronics* (Orion R&P Association, Moscow, 2014), pp. 67—69.
10. A. I. Patrashin, D. L. Baliev, K. O. Boltar, et al., in *Proc. XXIII Intern. Conf. Photoelectronics* (Orion R&P Association, Moscow, 2014), pp. 297—298.
11. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochka, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 131 (2014).