УДК 621.383:621.315.5

Исследование планарных фотодиодов МФЧЭ на основе гетероэпитаксиальной структуры InGaAs/InP

Д.С. Андреев, К.О. Болтарь, П.В. Власов, Н.А. Иродов, А.А. Лопухин

Приведены результаты исследования планарных фотодиодов (ФД) матричных фоточувствительных элементов (МФЧЭ) на основе гетероэпитаксиальной структруры InGaAs/InP формата 320x256 элементов с шагом 30 мкм, гибридизированных с различными типами БИС считывания. Показано, что для уменьшения взаимосвязи МФЧЭ при комнатной температуре необходимо увеличивать обратное смещение на ФД до уровня не менее 2 В. Установлено, что значительного уменьшения темнового тока можно добиться при уменьшении температуры МФЧЭ до –20 °С с помощью двухкаскадного термоэлектрического охладителя. Лучшее среднее по МФЧЭ значение темнового тока планарных фотодиодов при комнатной температуре достигает минимального значения 0,22 пА при оптимальном смещении на ФД равном –2,4 В.

PACS: 07.07.Df, 07.57.— c, 81.05.Ea, 81.65.Rv
Ключевые слова: темновые токи, планарный, фотодиоды на основе гетероэпитаксиальной структруры InGaAs/InP, МФЧЭ.

Введение

Обнаружительная способность матричного фотоприемника ограничивается темновыми токами фотодиодов. Зависимость предельной величины обнаружительной способности от темнового тока I_T определяется выражением $D^* \approx 1/\sqrt{I_T}$ [1]. В реальных фотодиодах темновой ток определяется, главным образом, дефектами в *p*—*n*-переходах и поверхностными утечками. В *pin*-фотодиоде суммарный темновой ток, складывающийся из тока I_T, обусловленного процессами генерации—рекомбинации в области пространственного заряда, и диффузионного темнового тока неосновных носителей заряда из квазинейтральной области $I_{Тдифф.}$ [9, 10], может быть достаточно мал при низких напряжениях смещения [2]. Однако для обеспечения быстродействия [11], а также уменьшения взаимосвязи *pin*-фотодиодов в МФЧЭ необходимо проникновение поля на всю глубину фоточувствительного слоя, что требует подачи значительного напряжения смещения. В то же время при увеличении напряжения смещения растет туннельная составляющая темнового тока и необходимо определять оптимальное смещение фотодиодов на основе эпитаксиальной структуры InGaAs/InP.

Целью данной работы являлось исследование планарных фотодиодов (ФД) матричных фоточувствительных элементов (МФЧЭ) на основе гетероэпитаксиальной структруры InGaAs/InP формата 320x256 элементов с шагом 30 мкм, гибридизированных с различными типами БИС считывания, в интересах определения условий, обеспечивающих оптимальные характеристики ФД.

Конструкция МФПУ

МФЧЭ изготовлены по планарной технологии на эпитаксиальной структуре InGaAs/InP, выращенной на подложке *n*+-InP методом МОС-гидридной эпитаксии [3]. Схема МФЧЭ приведена на рис. 1.

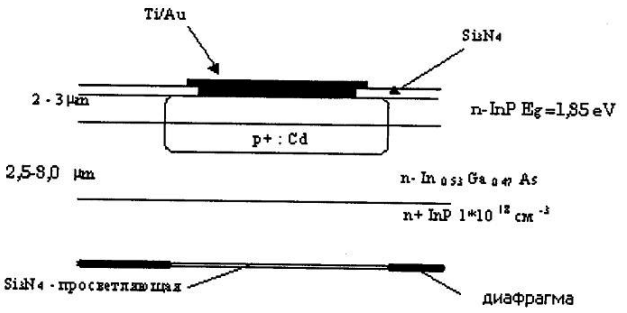


Рис. 1. Схема МФЧЭ на основе планарных фотодиодов из эпитаксиальной структуры InGaAs/ InP.

Андреев Дмитрий Сергеевич, вед. инженер-технолог[1].
Болтарь Константин Олегович, нач. НТК[1], профессор[2].
Власов Павел Валентинович, вед. инженер, аспирант[1].
Иродов Никита Александрович, инженер, аспирант[1].
Лопухин Алексей Алексеевич, вед. научный сотрудник[1].
[1]ОАО «НПО «Орион».
Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.
Тел.: 495–3739400. E-mail: orion@orion-ir.ru
[2]Московский физико-технический институт.
Россия, 141700, г. Долгопрудный МО,
Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2013 г.

© Андреев Д.С., Болтарь К.О., Власов П.В., Лопухин А.А., 2014

Элементы МФЧЭ являются *pin*-фотодиодами [5] и представляют многослойную структуру, состоящую из «широкозонного» слоя *n*-InP толщиной 2—3 мкм с концентрацией (1—2) $\cdot 10^{15}$ см$^{-3}$, активного поглощающего слоя *n*-$In_{0,53}Ga_{0,47}As$ толщиной 2,5—3,5 мкм с концентрацией (4—7) $\cdot 10^{14}$ см$^{-3}$ и подложки *n*+-InP толщиной 350 мкм с концентрацией (2—5) $\cdot 10^{18}$ см$^{-3}$. При этом *p*—*n*-переход образован локальной диффузией кадмия через маску нитрида кремния. Для просветляющего покрытия также использован нитрид кремния. Контактная площадка образована слоем золота с подслоем титана. Засветка матрицы осуществляется через подложку *n*+-InP.

Результаты исследований

Нами исследованы МФЧЭ формата 320×256, состоящие из планарных фотодиодов с шагом 30 мкм. На рис. 2 приведена темновая вольт-амперная характеристика типичного фотодиода, расположенного в центральной области матрицы.

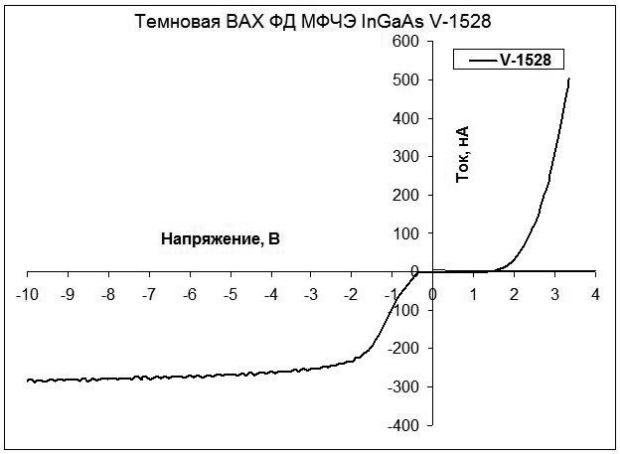


Рис. 2. Типичная темновая вольт-амперная характеристика планарных фотодиодов МФЧЭ из эпитаксиальной структуры InGaAs/ InP.

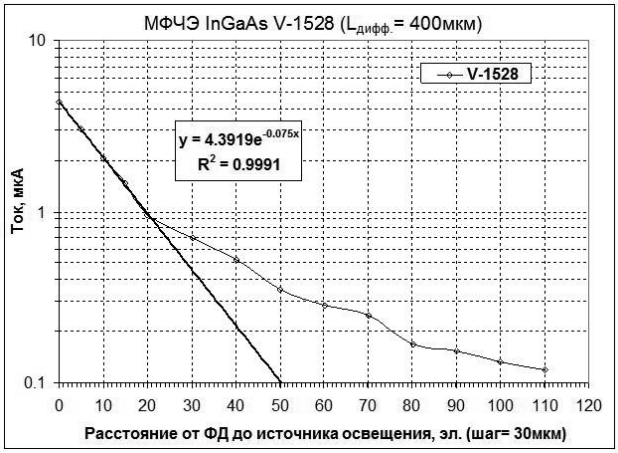


Рис. 3. Зависимость фототока фотодиода МФЧЭ из эпитаксиальной структуры InGaAs/ InP от расстояния до точечного источника освещения.

При увеличении обратного смещения на ФД более 1 В наблюдается значительное возрастание темнового тока. Для проверки возникшего предположения о собирании темнового тока с большой площади неподключенных ФД (из-за инверсной проводимости приповерхностного слоя или большой длины диффузии) снята зависимость сигнала фотодиода от расстояния до точечного источника излучения, которая приведена на рисунке 3.

Начальный участок этого графика хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью, из которой можно оценить величину диффузионной длины неосновных носителей заряда ~400 мкм. Таким образом, большая величина темнового тока фотодиода из МФЧЭ обусловлена собиранием темнового тока с большой площади, соизмеримой с размером всего матричного фоточувствительного элемента. Зная диффузионную длину и коэффициент диффузии дырок ~7,5 см^{2}с$^{-1}$ [4], можно оценить время жизни дырок из соотношения $\tau_p = L_p^2 / D_p \approx 210$ мкс, что соответствует известным зарубежным данным [6, 7].

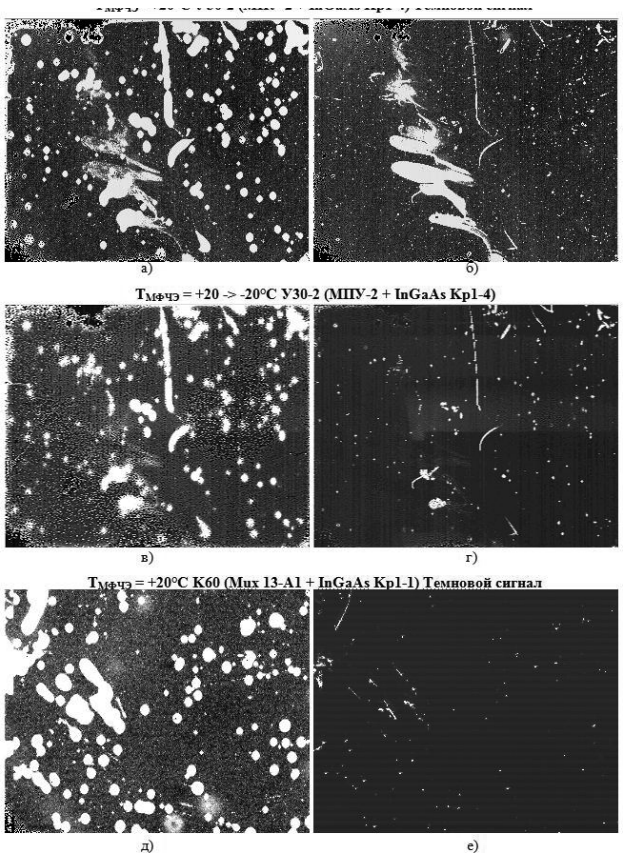
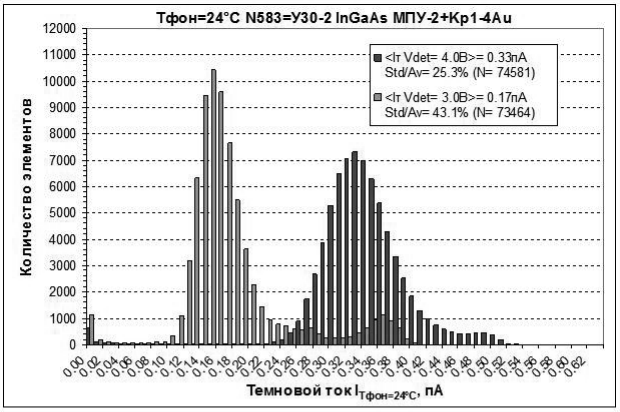


Рис. 4. Изображения карт дефектности фотоприемников с БИС считывания с разными емкостями накопления: темновой сигнал при температуре МФЧЭ +20 °С с емкостью накопления 10 фФ при малом смещении на ФД (а), при оптимальном смещении на ФД (б) и при изменении температуры от +20 °С (в) до –20 °С (г); темновой сигнал при температуре МФЧЭ +20 °С с емкостью накопления 880 фФ при оптимальном (д) и при минимальном (е) времени накопления.

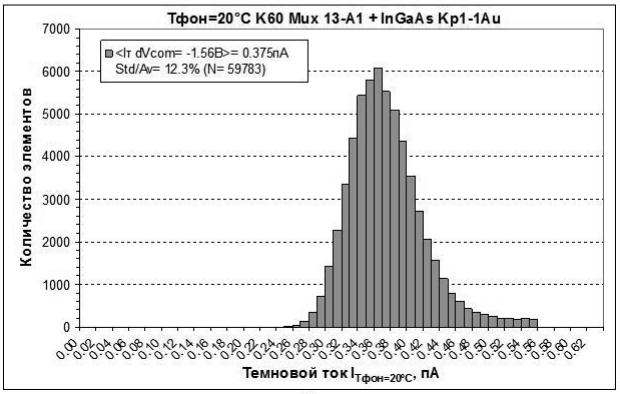
Были исследованы два матричных фотоприемника, изготовленные гибридизацией фоточувствительных элементов через индиевые микроконтакты с двумя типами БИС-считывания: с большой (0,88 пФ) и малой (10 фФ и 100 фФ) емкостями накопления. На рис. 4 приведены картины дефектности фотоприемников.

Для обоих образцов при малых обратных напряжениях смещения оказалось характерным наличие больших (имеющих форму круга или протяженных) областей дефектов типа «утечки». С увеличением обратного напряжения смещения на малой емкости накопления (рис. 4 а, б) можно наблюдать постепенное сужение этих дефектов и уже при рабочем напряжении (~ –2 В) смещения на ФД превращение их в точки. Данный эффект объясняется особенностями *pin*-фотодиодов. При больших напряжениях смещения поле проникает на глубину порядка 3 мкм, что обеспечивает дрейф носителей в электрическом поле и препятствует растеканию неосновных носителей заряда вследствие боковой диффузии.

На рисунке 4, б видно, что крупный дефект в центральной части МФЧЭ не уменьшился в размерах. По всей видимости, данный дефект не связан с диффузией неосновных носителей заряда, а является следствием поверхностных утечек. Помимо этого, с возрастанием обратного смещения возрастает количество точечных дефектных элементов.



а)



б)

Рис. 5. Гистограммы распределения темновых токов фотоприемников с БИС считывания при температуре МФЧЭ +20 °С с емкостью накопления 10 фФ при малом и оптимальном смещении на ФД (а); при температуре МФЧЭ +20 °С с емкостью накопления 880 фФ при смещении на ФД (б).

Аналогичное сужение области изображения дефектов (рис. 4, в, г) наблюдается при уменьшении температуры МФЧЭ до –20 °С, произведенное с помощью двухкаскадного термоэлектрического охладителя. Однако в данном случае крупный дефект в центральной части МФЧЭ не проявляется и не наблюдается возрастания количества точечных дефектных элементов, что означает сильную температурную зависимость этих видов дефектных утечек.

В фотоприемнике с большой емкостью накопления (рис. 4, д) уменьшения области изображения дефектов при увеличении напряжения смещения не наблюдается. Однако, при малых временах накопления (рис. 4, е) видно, что и здесь крупные области фотодиодов с взаимосвязью на самом деле не занимают столь большую площадь, а являются следствием точечных, либо тонких протяженных дефектов.

Приведенные изображения показывают, что для уменьшения взаимосвязи в МФЧЭ необходимо увеличивать смещение на ФД и понижать температуру МФЧЭ.

При расчете темновых токов измеряется напряжение на выходах БИС считывания [12] при времени накопления *T*, при котором напряжение на емкости накопления лежит в области постоянства внутреннего коэффициента передачи БИС считывания *K*. [8] Величина темнового тока $I_{\text{Т}}$ определяется по разряду емкости накопления за время накопления *T* и равна:

$$I_{\text{Т}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}} \cdot C1}{T \cdot K} \qquad (1)$$

Гистограммы распределения темновых токов обоих образцов приведены на рисунке 5, а, б.

Среднее значение темного тока для фотоприемника с малой емкостью накопления составило 0,33 пА, с большой емкостью — 0,38 пА.

График на рис. 6 показывает зависимость напряжения темнового сигнала и среднеквадратичного значения шума от времени накопления. Сигнал от времени накопления линейно возрастает, а зависимость шума близка к корневой, что говорит о дробовом характере шума фотоприемника.

Для сравнения измерены темновые токи фотоприемника, изготовленного гибридизацией МФЧЭ из другой пластины InGaAs с БИС считывания с малой емкостью накопления. Измерения проведены при емкостях накопления 10 фФ и 100 фФ.

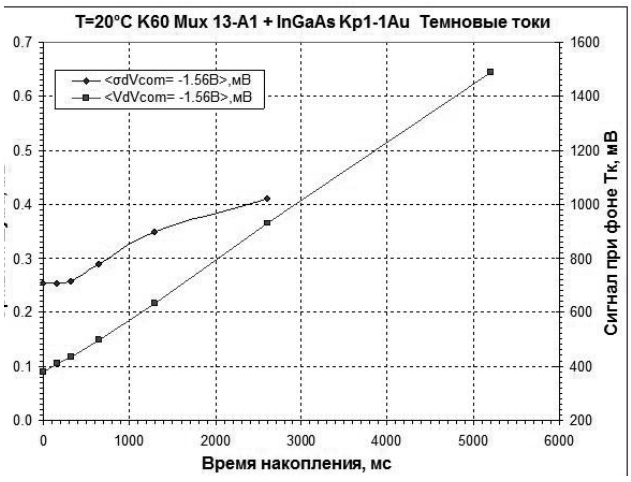


Рис. 6. Зависимости напряжения темнового сигнала и среднеквадратичного значения шума от времени накопления фотоприемника с БИС считывания с емкостью накопления 880 фФ при температуре МФЧЭ +20 °С.

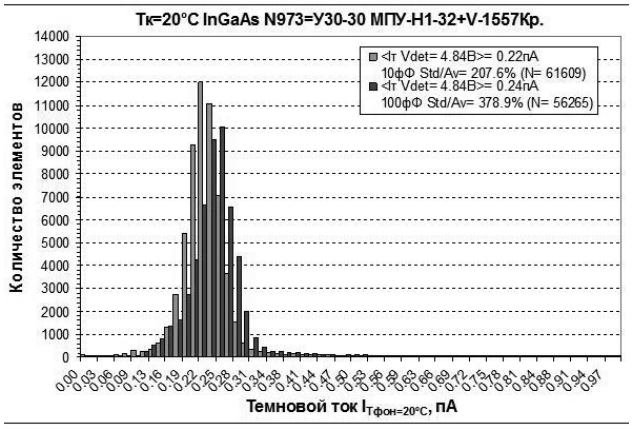


Рис. 7. Гистограммы распределения темновых токов фотоприемника с БИС считывания с емкостями накопления 10 фФ и 100 фФ при температуре МФЧЭ +20 °С.

Результаты проиллюстрированы на рис. 7. Полученные средние значения темнового тока составили 0,22 пА и 0,24 пА, соответственно, при оптимальном смещении на ФД равном –2,4 В. Значения темновых токов фотодиодов для различных пластин InGaAs одинаковой структуры различаются несущественно.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что для уменьшения взаимосвязи в МФЧЭ при комнатной температуре необходимо увеличивать обратное смещение на ФД до уровня не менее 2 В.

Среднее по МФЧЭ значение темнового тока планарных фотодиодов при комнатной температуре достигает минимального значения 0,22 пА при оптимальном смещении на ФД равном –2,4 В.

Литература

1. *Marshall J. Cohen, Martin H. Ettenberg, Michael J. Lange, and Gregory H.* Commercial and Industrial Applications of Indium Gallium Arsenide Near Infrared Focal Plane Arrays//3490 U.S. Route 1, Princeton, NJ 08540. Перевод с анг. под ред. доктора тех. *наук М.*А Тришенкова. Техника оптической связи. Фотоприемники.— М.: Мир, 1988.

2. *Андреев Д.С., Чинарёва И.В.* Кристалл матрицы pin-фотодиодов формата 322x258 на основе гетероструктур InGaAs/InP // Заявка на госрегистрацию топологии интегральной схемы. 2011.

3. *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.

4. *Goldberg Yu.A. and N.M. Schmidt* // Handbook Series on Semiconductor Parameters, vol.2, M. Levinshtein, S. Rumyantsev *and M.* Shur, World Scientific, London, 1999, PP. 62–88.

5. *Филачев А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А.* Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды.— М.: Физматкнига, 2011.

6. *Yuan H., Meixell M., Zhang J., Bey P., Kimchi J., Kilmer L.C.* // Proc. of SPIE Conference on Infrared Technology and Applications XXXVIII. 2012. V. 8353. P. 09–6.

7. *Zemel A., Gallant M.*// J. Appl. Phys. 1988. V. 64. No. 11. P. 6552

8. *Бурлаков И.Д., Голубков А.В., Дирочка А.И., Касаткин И.Л., Лопухин А.А., Пасеков В.Ф., Пономаренко В.П., Чишко В.Ф.* // Прикладная физика. 2005. № 2. С. 16

9. *Селяков А.Ю.* // Прикладная физика. 2007. № 4. С. 75

10. *Селяков А.Ю.* // Прикладная физика. 2009. № 6. С. 127

11. *Андреев Д.С., Гришина Т.Н., Залетаев Н.Б., Тришенков М.А.* // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 86

12. *Зайцев А.А., Хромов С.С., Болтарь К.О., Кузнецов П.А.* // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 97

Research of FPA's planar photodiodes on the base of the InGaAs/InP heteroepitaxial structure

D. S. Andreev, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, N. A. Irodov, and A. A. Lopuhin

Orion R&P Association
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru
Received December 15, 2013

A heteroepitaxial structure InGaAs/InP based photosensitive Focal Plane Array (FPA) has been researched. The format is 320x256 pixels with a 30μm pitch, hybridized with various ROIC distribution characteristics are presented. Shown, that for decrease of crosstalk photodiodes in FPA at a room temperature it is necessary to increase bias up to a level not less than — 2 V. Average dark current data planar photodiodes in FPA at a room temperature has been defined based on the measured I–V characteristics, dark current of 0,22 pA at the optimal bias on photodiods equal –2,4 V.

PACS: 07.07.Df, 07.57.— c, 81.05.Ea, 81.65.Rv
Keywords: dark currents, planar, photodiodes of heteroepitaxial structure InGaAs/InP, Focal Plane Array

References

1. Marshall J. Cohen, Martin H. Ettenberg, Michael J. Lange, and Gregory H., *Commercial and Industrial Applications of Indium Gallium Arsenide Near Infrared Focal Plane Array* (3490 U.S. Route 1, Princeton, NJ 08540).
2. D. S. Andreev and I. V. Chinareva, *Chip of the 322x258 matrix of pin-photodiodes on the InGaAs/In*P *base* (Patent Application, RF, 2011).
3. O. V. Ogneva, I. V. Chinareva, et al., (Russian Federation Patent. No. 2318272, 2008).
4. Yu. A. Goldberg and N. M. Schmidt, in *Handbook Series on Semiconductor Parameters*, Ed. by M. Levinshtein, S. Rumyantsev and M. Shur, (World Scientific, London, 1999), Vol. 2, pp. 62–88.
5. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes.* (Fizmatkniga, Moscow, 2011).
6. H. Yuan, M. Meixell, J. Zhang, et al., Proc. SPIE **8353**, 09–6 (2012).
7. A. Zemel and M. Gallant, J. Appl. Phys. **64**, 6552 (1988).
8. I. D. Burlakov, A. V. Golubkov, A. I. Dirochka, et al., Prikladnaya Fizika, No. 2, 16 (2005).
9. A. Yu. Selyakov, Prikladnaya Fizika, No. 4, 75 (2007).
10. A. Yu. Selyakov, Prikladnaya Fizika, No. 6, 127 (2009).
11. D. S. Andreev, T. N. Grishina, et al., Prikladnaya Fizika, No. 4, 86 (2012).
12. A. A. Zaitsev, S. S. Khromov, K. O. Boltar, et al., Prikladnaya Fizika, No. 2, 97 (2011).