

Некоторые особенности получения фототока в одно- и многобарьерных фотодиодных структурах

© А.В. Каримов[¶], Д.М. Ёдгорова

Физико-технический институт Научно-производственного объединения „Физика–Солнце“
Академии наук Республики Узбекистан,
100084 Ташкент, Узбекистан

(Получена 14 мая 2009 г. Принята к печати 15 сентября 2009 г.)

Многобарьерные фотодиодные структуры в отличие от однобарьерных фотодиодных структур обладают эффектом увеличения фотогенерированных носителей тока во всем диапазоне рабочих напряжений, в то время как в фотодиодах с лавинным и инжекционным процессами появление фототока носит пороговый характер и связан с изменением темновых носителей тока. Предлагаемый способ интерпретации эффекта внутреннего фотоэлектрического усиления позволит произвести оценку экспериментальных значений коэффициентов усиления по току или по напряжению и определить наличие фотоэлектрического усиления в фотодиодных структурах независимо от их происхождения.

1. Введение

В настоящее время оптическая передача сигналов начинает вытеснять электрические способы передачи информации. Оптические методы передачи отличаются высокой помехоустойчивостью, большой скоростью передачи данных, возможностью передачи нескольких данных с помощью лишь одного оптического кабеля. Прием и передача оптических сигналов осуществляется с помощью основных элементов — излучающего лазера или светодиода, носителя информации светового волокна, а также приемника на основе фотодиода. Бурное развитие волоконно-оптических систем передачи информации обусловлено систематическим совершенствованием оптических волокон [1], оптических усилителей [2], что в свою очередь требует разработки соответствующих излучателей [3] и фотоприемников [4]. Однако существующие принципы образования фототоков и виды фотоприемников отличаются разнообразием. В дополнение к ним начинают разрабатываться новые технологические решения, способствующие созданию нетрадиционных фотоприемников, основанных на низкоразмерных и других эффектах [5]. С этой целью целесообразно рассмотреть особенности физических процессов формирования фототоков, видов фотодиодных структур, механизмов усиления фототока и их неразрывной связи с условиями фоточувствительности, а также некоторых особенностей получения фототока нового поколения в двух- и трехбарьерных фотоприемниках.

Данная работа посвящена анализу некоторых физических процессов образования фототока в одно- и двухбазовых фотодиодных структурах, выработке критериев оценки внутреннего фотоэлектрического усиления фототока.

Требования к фоточувствительным структурам постоянно возрастают. Ряд устоявшихся приборов, можно сказать, переходят в разряд классических, начинают

разрабатываться новые модификации, обладающие отличительными свойствами [6]. Нами для проведения исследований процесса генерации фототока были изготовлены специальные структуры. Это фотодиоды с варизонной базовой областью, двухбарьерные инжекционно-полевые и трехбарьерные фотодиоды [7,8]. Они представляют интерес как приемники слабых оптических сигналов для применения в фотоприемных модулях устройств различного назначения, например для дистанционного управления технологическими процессами, охранной сигнализации, телекоммуникации и других.

2. Экспериментальные образцы

При выборе диодной гетероструктуры $(\text{Au} + \text{Zn}) - p\text{-AlGaAs} - n\text{-GaAs} - (\text{Sn})$ с варизонной базовой областью исходили из того, что в ней можно повысить фоточувствительность за счет создания тянущего внутреннего электрического поля.

В такой фотодиодной гетероструктуре фронтальный фотоприемный слой с положительным градиентом получен в поршневой кассете, обеспечивающей линейное увеличение доли Al в ходе роста слоя изотермической жидкостной эпитаксии. В частности, ширина запрещенной зоны гетерослоя увеличивается от 1.43 до 1.8 эВ от границы с $n\text{-GaAs}$ к поверхности. Геометрическая конструкция гетероструктуры с варизонной фотоприемной поверхностью приведена на рис. 1. В ней концентрация носителей в n -области из GaAs толщиной 400 мкм составляет $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а в эпитаксиальном слое $p\text{-AlGaAs}$ толщиной ~ 1.6 мкм равна $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Омические контакты к фронтальной поверхности получены вакуумным напылением через маску сплава Au + Zn, а с тыльной стороны $n\text{-GaAs}$ нанесен сплошной слой Sn также вакуумным напылением. В результате получены фотодиодные структуры $(\text{Au} + \text{Zn}) - p\text{-AlGaAs} - n\text{-GaAs} - (\text{Sn})$. Рассмотрение их вольт-амперных характеристик (рис. 2) показывает,

[¶] E-mail: karimov@uzsci.net

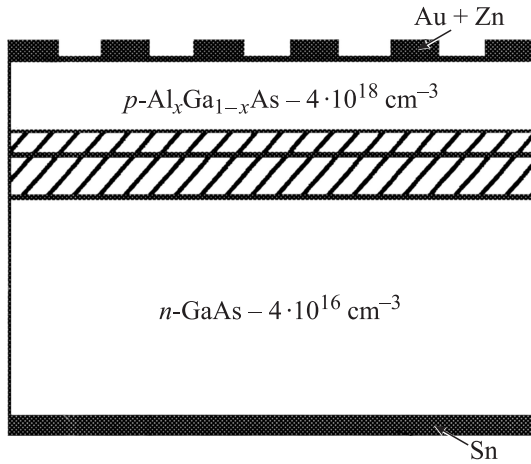


Рис. 1. Конструкция гетероструктуры (Au + Zn)–*p*-AlGaAs–*n*-GaAs–(Sn) с варизонной фотоприемной поверхностью. Параметр *x* в формуле твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$ изменялся от 0 до 0.3.

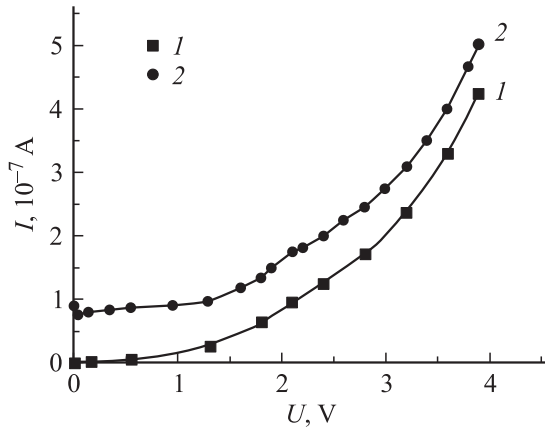


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики структуры *p*-AlGaAs–*n*-GaAs с варизонной фотоприемной областью: 1 — темновая, 2 — при освещении лампой с $\lambda = 0.55$ мкм.

что в такой гетероструктуре при напряжении 200 мВ темновой ток равен 10^{-9} А. Величина светового тока при нулевом смещении на порядок больше темнового ($9 \cdot 10^{-8}$ А). Здесь следует отметить, что световые характеристики измерялись при воздействии от галогеновой лампы с максимумом при длине волны 0.55 мкм.

Двухсторонне чувствительные двухбарьерные *p*–*n*–*m*-структуры (*m* — металл) были изготовлены с толщиной эмиттерной области (1 мкм), меньшей глубины проникновения света, и с концентрацией носителей заряда ($4 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$), на 2 порядка превышающей концентрацию носителей ($4 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$) в базовой области. В свою очередь толщина базовой области ($d = 350$ мкм) выбиралась намного больше диффузионной длины неосновных носителей ($d \gg L_{p,n}$), как и требуется для инжекционных диодов. Геометрия исследуемой двухбарьерной структуры *p*-(Al $_{0.08}$ Ga $_{0.82}$) $_{0.9}$ In $_{0.1}$ As–*n*-GaAs–Au приведена на

рис. 3, где показано, что она содержит навстречу включенные два перехода (*p*–*n*, *n*–*m*).

Другая особенность данной структуры заключается в том, что при подаче положительной полярности напряжения к *p*-слою она становится аналогом длинного диода, т. е. инжекционного диода. При смене полярности приложенного напряжения может выполнять функцию фотоприемника, приближаясь по свойствам к *p*–*i*–*n*-диодам, но с управляемой напряжением толщиной обедненной области.

Трехбарьерная фотодиодная структура (Au)–*n*-AlGaAs–*p*-GaAs–(Ag) получена на базе *p*–*n*-перехода, в котором область *p*-типа представляет собой объемный кристалл из арсенида галлия с $N_A = (5-7) \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, а область *n*-типа состоит из эпитаксиального слоя AlGaAs с $N_D = 2 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$. Толщина области *n*-типа, выращенной жидкостной эпитаксией, составляет 1.5–2 мкм. С тыльной стороны области *p*-типа сформирован выпрямляющий (100 Å) контакт из Ag, а на поверхность области *n*-типа нанесен потенциальный барьер из полупрозрачного слоя Au, как показано на рис. 4. Площадь структур находится в пределах 8–80 мм 2 , а удельная емкость ~ 0.2 пФ/мм 2 .

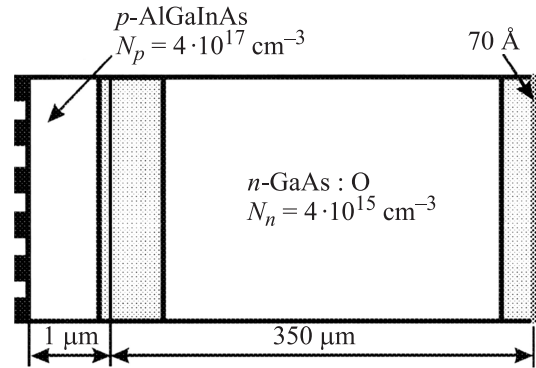


Рис. 3. Геометрическая конструкция исследуемого двухбарьерного фотодиода.

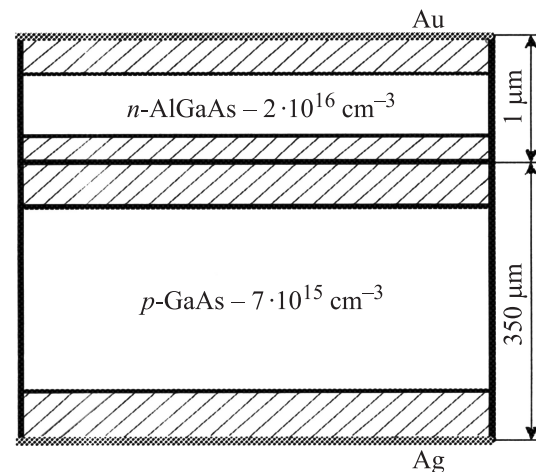


Рис. 4. Геометрическая конструкция исследуемого трехбарьерной гетероструктуры (Au)–*n*-AlGaAs–*p*-GaAs–(Ag).

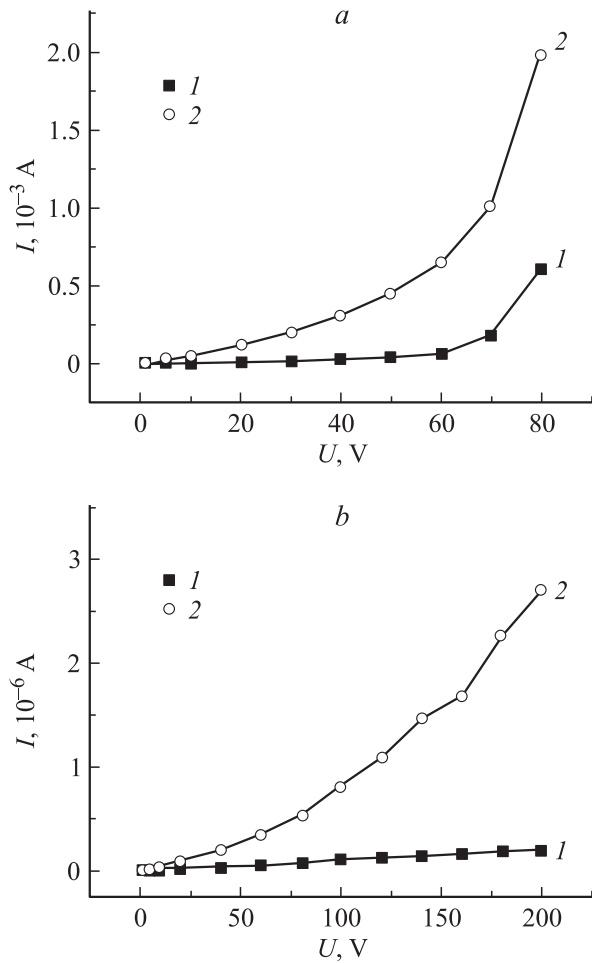


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики структур: *a* — $p\text{-Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.82}\text{In}_{0.1}\text{As}-n\text{-GaAs}-(\text{Au})$; *b* — $(\text{Au})-n\text{-AlGaAs}-p\text{-GaAs}-(\text{Ag})$. Характеристики: 1 — в темноте, 2 — при освещении со стороны гетерослоя.

Вольт-амперные характеристики обеих фотодиодных структур при освещении со стороны гетерослоя приведены на рис. 5, *a* и *b*. Наблюдаемые на рисунке различия токовых зависимостей можно объяснить отличием процессов и места фотогенерации носителей, а также особым поведением темнового тока от напряжения. В двухбарьерной структуре фотоносители генерируются в гетерослое, а в трехбарьерной структуре — в области объемного заряда потенциальных барьеров. Во всех образцах имеем темновые и световые токи.

Во всех образцах имеем темновые и световые кривые. Откуда можно оценить экспериментальные величины фототока, т.е. разность светового и темнового значений токов

$$I^{\text{photo}} = I^{\text{light}} - I^{\text{darc}}$$

независимо от их механизма образования. Сравнение фотоэлектрических характеристик полученных фотодиодных структур показывает, что в фотодиодной структуре с варизонной базовой областью фототок с увеличением рабочего напряжения от нуля до 4 В умень-

шается (рис. 2). Что касается инжекционно-полевого фотодиода, то в нем наблюдаем увеличение фототока с последующим замедлением роста из-за увеличения темнового тока (рис. 5, *a*), а в трехбарьерной структуре наблюдается последовательное увеличение фототока с напряжением (рис. 5, *b*). При этом темновой ток структуры с варизонной базовой областью за пределами 1 В монотонно увеличивается, а двухбарьерной $p-n-t$ -структуре его рост наблюдается лишь при напряжениях, больших 60 В. В трехбарьерной структуре обратный темновой ток от напряжения изменяется практически близко к линейному.

С другой стороны, если в однобарьерной гетеро- $p-n$ -структуре наблюдаем уменьшение фототока с напряжением, то в двух- и трехбарьерных структурах видим его увеличение [9,10]. Этот эффект увеличения фототока связан с внутренним фотоэлектрическим усилением, вызываемым процессами, происходящими в области объемного заряда, где темп генерации фотоносителей начинает превалировать над приращением концентрации носителей, создающих обратный темновой ток, по мере увеличения приложенного напряжения. Физически оно достигается за счет ограничения инжекции носителей через прямосмещенный переход за счет введения последовательно соединенного с ним обратносмещенного потенциального барьера в единой структуре [6]. В результате количество носителей, инжектируемых через прямосмещаемый переход, равно количеству фотогенерированных носителей. При этом с ростом рабочего напряжения U наблюдается увеличение фоточувствительности до $S = 10$ А/Вт (рис. 6).

Таким образом, принципиальное отличие модифицированных двух- и трехбарьерных структур от классических структур состоит в том, что в них фототок появляется во всем диапазоне напряжений, начиная с самого начального участка. В то время как в широко используемых лавинных фотодиодах (ЛФД) фототок создается лишь в предпробойной области в узком

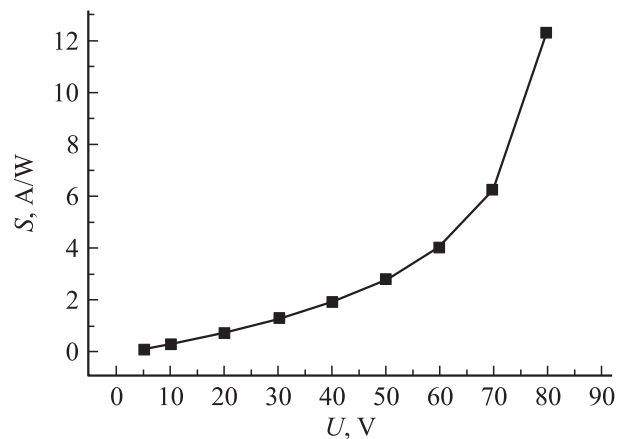


Рис. 6. Зависимость токовой фоточувствительности S от напряжения U для гетероструктуры $(\text{Au} + \text{Zn})-p\text{-AlGaAs}-n\text{-GaAs}-(\text{Sn})$ при мощности светового потока $1.62 \cdot 10^{-4}$ Вт.

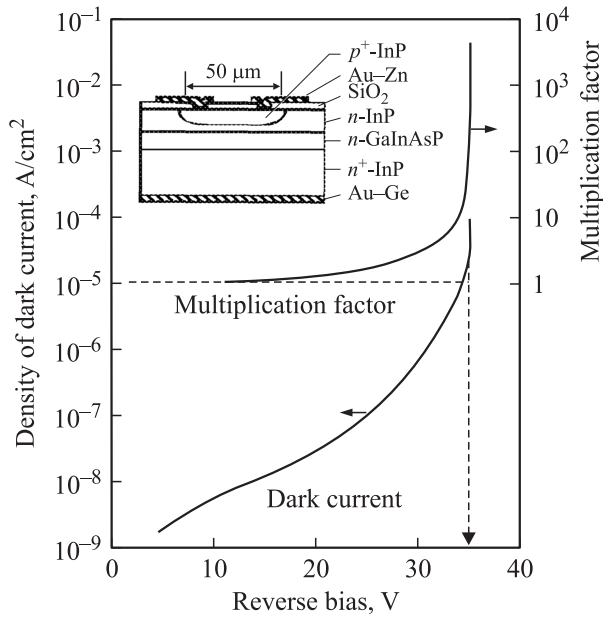


Рис. 7. Зависимости коэффициента умножения и плотности темнового тока от обратного напряжения для лавинного фотодиода с гетероструктурой на основе GaInAsP.

диапазоне напряжений (в районе 36 В) (рис. 7), для ЛФД характерным является уход рабочей точки как при изменении температуры при увеличении плотности тока, так и при незначительном колебании рабочего напряжения [11].

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Фактически многобарьерный фотодиод представляет собой „усилитель-преобразователь“ малых оптических сигналов в электрический сигнал. Ход роста тока от напряжения характеризует крутизну динамической проводимости, т.е. отношение приращения тока к приросту напряжения

$$\xi = \frac{dI}{dU} = d\sigma. \quad (1)$$

Ее величина пропорциональна фоточувствительности многобарьерного фотодиода и при изменении рабочего напряжения изменяется в соответствии с динамическим выходным сопротивлением, а также увеличивается с интенсивностью освещения. Отношение световой крутизны к темновой крутизне характеризует коэффициент внутреннего фотоэлектрического усиления

$$M = \frac{\xi^{\text{light}}}{\xi^{\text{darc}}}. \quad (2)$$

Особенность эффекта внутреннего фотоэлектрического усиления заключается в том, что коэффициент внутреннего фотоэлектрического усиления в многобарьерных

фотодиодах в зависимости от режима включения (генератор тока или напряжения) обеспечивает как токовое усиление, так и усиление по напряжению благодаря его высокому выходному сопротивлению.

В режиме генератора напряжения, когда сопротивление нагрузки $R_l \rightarrow 0$ для фиксированных напряжений и соответствующей освещенности, будем иметь фототок — скачок тока от темнового значения к световому, при этом соответственно получим световую крутизну динамической проводимости по току

$$\xi_I^{\text{light}} = \frac{\partial I^{\text{light}}}{\partial U} \quad (3)$$

и темновую

$$\xi_I^{\text{darc}} = \frac{\partial I^{\text{darc}}}{\partial U}. \quad (4)$$

Подставляя выражения (3) и (4) в формулу (2), получим внутреннее фотоэлектрическое усиление по току

$$M_I = \frac{\partial I^{\text{light}}}{\partial I^{\text{darc}}} = \frac{I_{\text{max}}^{\text{light}} - I_{\text{min}}^{\text{light}}}{I_{\text{max}}^{\text{darc}} - I_{\text{min}}^{\text{darc}}}. \quad (5)$$

С другой стороны, поскольку световой ток представляет собой сумму фототока и темнового тока

$$I^{\text{light}} = I^{\text{photo}} + I^{\text{darc}}, \quad (6)$$

формула (5) принимает следующий вид:

$$M_I = \frac{\partial (I^{\text{photo}} + I^{\text{darc}})}{\partial I^{\text{darc}}}. \quad (7)$$

Следовательно, выражая фототок через фоточувствительность — отношение фототока к падающей световой мощности Φ

$$S_I^{\text{photo}} = \frac{I^{\text{photo}}}{\Phi}, \quad (8)$$

получим взаимосвязь коэффициента фотоэлектрического усиления по току с фоточувствительностью

$$M_I = \frac{\partial (I^{\text{photo}} + I^{\text{darc}})}{\partial I^{\text{darc}}} = \frac{\partial (S_I^{\text{photo}} \Phi + I^{\text{darc}})|_{U_2-U_1}}{(\partial I^{\text{darc}})|_{U_2-U_1}}. \quad (9)$$

Из формулы (5) видно, что чем меньше значение приращения темнового тока, тем больше фотоэлектрическое усиление.

В режиме генератора тока ($I = \text{const}$), когда $R_l \rightarrow \infty$, при освещении фотодиода получим уменьшение напряжения на нагрузке, обусловленное разностью темнового и светового напряжений при заданном токе, при этом соответственно получим световую крутизну динамической проводимости по напряжению

$$\xi_U^{\text{light}} = \frac{\partial I}{\partial U^{\text{light}}} \quad (10)$$

и темновую

$$\xi_U^{\text{darc}} = \frac{\partial I}{\partial U^{\text{darc}}}. \quad (11)$$

В данном случае имеем внутреннее фотоэлектрическое усиление по напряжению. Подставляя выражения (10) и (11) в формулу (2), получим коэффициент внутреннего фотоэлектрического усиления по напряжению

$$M_U = \frac{\partial U^{\text{darc}}}{\partial U^{\text{light}}} = \frac{U_{\text{max}}^{\text{darc}} - U_{\text{min}}^{\text{darc}}}{U_{\text{max}}^{\text{light}} - U_{\text{min}}^{\text{light}}}. \quad (12)$$

Закономерности изменения темнового и светового токов от напряжения в исследуемых фотодиодных структурах можно объяснить физическими процессами, протекающими в их соответствующих областях. Так, в двухбарьерной структуре генерация фотоносителей осуществляется из гетерослоя, что приводит к увеличению концентрации носителей в базовой области, а в трехбарьерной структуре фотоносители создаются в области объемного заряда запираемого барьера. Для объяснения этого эффекта результаты, полученные из данных ВАХ, подставим в формулы (5) и (12) и вычислим коэффициенты внутреннего фотоэлектрического усиления (ВФУ) по току и напряжению.

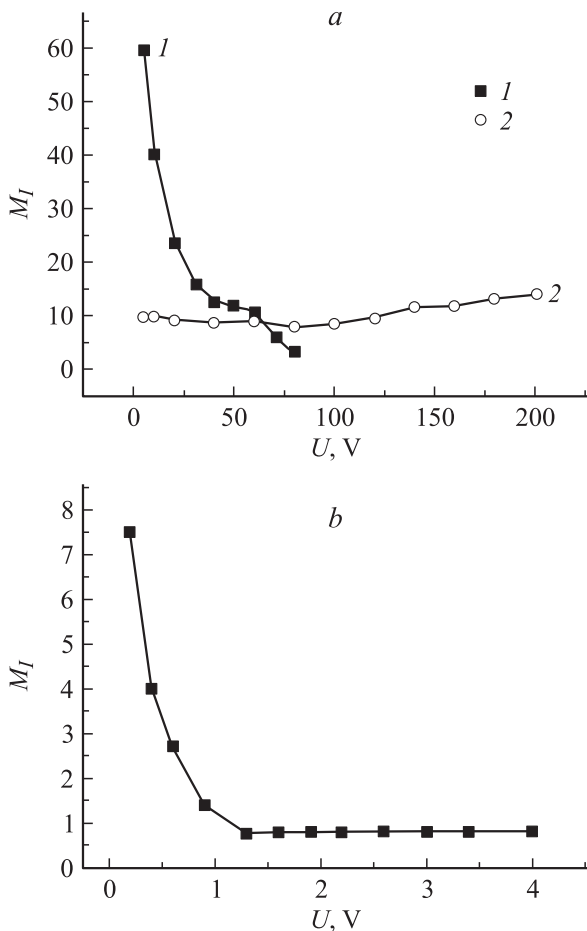


Рис. 8. Зависимости коэффициента внутреннего фотоэлектрического усиления по току M_I от напряжения U для: *a* — двухбарьерной (кривая 1) и трехбарьерной (кривая 2) структур; *b* — для гетероструктуры (Au + Zn)-*p*-AlGaAs-*n*-GaAs-(Sn).

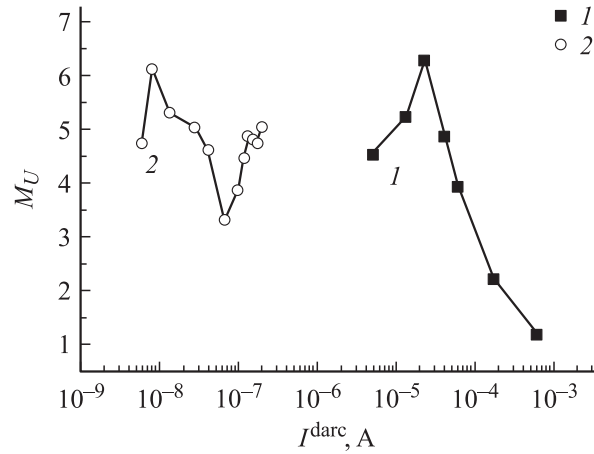


Рис. 9. Зависимости коэффициента внутреннего фотоэлектрического усиления по напряжению M_U от величины темнового тока I^{darc} (в режиме генератора тока) для структур: 1 — двухбарьерной и 2 — трехбарьерной.

Из рис. 8, *a* видно, что коэффициент ВФУ по току в двухбарьерной структуре уменьшается с ростом напряжения, а в трехбарьерной структуре возрастает. В однобарьерной структуре (рис. 8, *b*) усиление фототока имеет место на начальном участке вольт-амперной характеристики и далее с 1.0 В усиление отсутствует из-за увеличения темнового тока. Наблюдаемое поведение коэффициентов ВФУ объясняется тем, что в двухбарьерной структуре с напряжением возрастает темновая составляющая тока за счет носителей, поступающих в базовую область из гетерослоя, а также за счет составляющих темнового тока перехода металл-полупроводник *n*-*m* (рис. 5, *a*).

В трехбарьерной структуре с напряжением увеличивается толщина слоя объемного заряда под металлическим барьером и пропорционально возрастает количество генерируемых светом носителей (рис. 5, *b*).

Что касается коэффициента ВФУ по напряжению, то обеим структурам свойственно увеличение его значения на начальном участке и связанное с ходом световой (темновой) характеристики его дальнейшее уменьшение (рис. 9).

Таким образом, эффект ВФУ характеризуется коэффициентом усиления по току и по напряжению, при этом усиление по току определяет фоточувствительность, а усиление по напряжению вытекает из предрасположенности фотодиода к усилению оптических сигналов с уровнем, близким к фоновому.

4. Заключение

Таким образом, многобарьерные фотодиодные структуры в отличие от однобарьерных фотодиодных структур обладают эффектом увеличения фотогенерированных носителей во всем диапазоне рабочих напряжений, в то время как в фотодиодах с лавинным и инжекционным

процессами появления фототока носит пороговый характер и связано с изменением концентрации темновых носителей. Вышеприведенная интерпретация эффекта ВФУ позволит произвести оценку экспериментальных значений коэффициентов усиления по току или по напряжению и определить наличие ВФУ в фотодиодных структурах независимо от их происхождения.

Список литературы

- [1] I. Kim. *Opt. Eng.*, **37**, 3143 (1998).
- [2] E.M. Dianov et al. *Optics Lett.*, **15**, 314 (1990).
- [3] Л.В. Асрян, Р.С. Сурис. *ФТП*, **38**, 3 (2004).
- [4] A.V. Karimov, D.M. Yodgorova, E.N. Yakubov. *Semiconductor Phys., Quant. Electron. Optoelectron.*, **4**, 378 (2004).
- [5] C.C. Hodge et al. *Semicond. Sci. Technol.*, **5**, 319 (1990).
- [6] M.D. Petroff, M.G. Stapelbroek. *Blocked Impurity Band Detectors*. U.S. Patent N 4, 568, 960; filed Oct. 1980; granted 4 Feb. 1986.
- [7] A.V. Karimov, D.M. Yodgorova. *Radioelectron. Commun. Systems*, **2**, 55 (2006).
- [8] A.V. Karimov, D.A. Karimova. *Proc. Conf. on Materials Science in Semiconductor Processing* (February–June, 2003) v. 6, N 1–3, p. 137.
- [9] А.В. Каримов, Д.М. Ёдгорова. *Электроника*, **11**, 5 (2005).
- [10] А.В. Каримов, Д.М. Ёдгорова, Ф.А. Гиясова, Т.М. Азимов, У.М. Бузруков, А.А. Якубов. *Технология и конструирование в электрон. аппаратуре*, **4**, 23 (2007).
- [11] K. Nishida, K. Taduchi, Y. Matsumova. *Appl. Phys. Lett.*, **35**, 251 (1979).

Редактор Т.А. Полянская

Some features of a photocurrent reception in the one-barrier and multibarrier photodiode structures

A.V. Karimov, D.M. Yodgorova

Physicotechnical Institute of the Scientific Association „Physics–Sun“ of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
100084 Tashkents, Uzbekistan

Abstract Multibarrier photodiode structures as opposed to one-barrier photodiode structures have effect of increased in the photogenerated carriers in all range of operating voltages while in photodiodes with avalanche and injection processes photocurrent emergence has threshold character and is bundled to fluctuation of dark carriers. A suggested method of interpreting of effect of interior photoelectric amplification will allow to estimate the experimental values of amplification factors on current or on voltage and to define presence of photoelectric amplification in photodiode structures regardless of their nature.