

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА,  
Ш. Ш БОЛТАЕВА, Л. Х. ЗОИРОВА

Узбекистан, г. Ташкент, НПО "Физика-Солнце"  
E-mail: karimov@uzsci.net

Дата поступления в редакцию  
31.01 2006 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН  
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

## ОЦЕНКА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА В ТРЕХБАРЬЕРНОЙ СТРУКТУРЕ

*Предложена экспериментально-расчетная методика определения напряжений, падающих на каждом из переходов трехбарьерной структуры. Результаты могут быть использованы для оценки параметров структуры.*

В настоящее время повышение эффективности полупроводниковых приборов стали осуществлять в технологическом процессе за счет привлечения нескольких барьеров. Так, эффективность структур типа солнечного элемента повышают путем последовательного соединения в один каскад нескольких элементов, включенных в одном направлении с помощью туннельных переходов между ними [1]. В фотодиодных структурах с целью повышения быстродействия создают встречно-штыревые планарные структуры с двумя барьерами Шоттки [2]. В них наличие областей объемного заряда под двумя барьерными контактами приводит к уменьшению суммарной емкости структуры и, тем самым, к повышению быстродействия. В данных структурах благодаря тому, что один из барьеров всегда включен в противоположном направлении по отношению к остальным переходам, все процессы определяются запираемым переходом, падение напряжения определяется в основном запирающим контактом. Поэтому их вольт-амперные характеристики представляются обратными ветвями. Здесь активной фоточувствительной областью является часть слоя, заключенного между планарными контактами, т. е. они чувствительны с одной стороны, и контакты функционально являются взаимозаменяемыми.

Двухсторонне чувствительные двухбарьерные  $m-p$ - $m$ -,  $m-n$ - $m$ -структуры с двумя барьерами Шоттки приведены в работе [3]; благодаря тому, что в них фотоприемными являются оба выпрямляющих перехода "металл—полупроводник", они обладают высокой фоточувствительностью в коротковолновой области спектра.

Для повышения фоточувствительности и быстродействия фотодиодных структур в работах [4, 5] осуществлено интегрирование  $p-n$ -перехода с обратновключенными переходами "металл—полупроводник" в единую структуру. Таким образом получены двухсторонне чувствительные двухбарьерные  $m-p-n$  [6, 7] и трехбарьерные  $m-p-n-m$ -структуры с идентичными вольт-амперными характеристиками [8]. Их па-

раметры существенным образом зависят от технологии получения активных слоев и потенциальных барьеров. Авторами работ [9—11] получены двухбарьерные структуры с неидентичными ветвями вольт-амперных характеристик, которые объяснены неоднородным распределением электрического поля в барьерах при смене полярности.

На образцах, приведенных в упомянутых работах, получены значения фоточувствительности, намного превышающие фоточувствительность обычных фотодиодных структур с одним переходом [12]. Изучены процессы фотоэлектрического усиления и формирования спектральных характеристик в трехбарьерной  $m-pGaAs-nAlGaAs-m$ -структуре [13, 14]. Однако процессы, происходящие в области объемного заряда, которые ответственны за фотоэлектрическое усиление, остаются неизученными. В рабочем режиме по мере изменения приложенного напряжения они перераспределяются между обратновключенными барьерами. Характер их перераспределения и ход роста определяют фотоэлектрические характеристики, что требует изучения электронных процессов в темноте.

Целью настоящей работы является оценка перераспределения напряжений, падающих на каждом переходе трехбарьерной  $m_1-p-n-m_2$ -структуры.

### Особенности токовых характеристик трехбарьерных структур

Рассматриваемые трехбарьерные структуры представляют собой диоды с двумя токоотводящими контактами. Они получены на основе полупроводникового (гомо- или гетеро-)  $p-n$ -перехода со сформированными к поверхностям обеих областей выпрямляющими переходами "металл—полупроводник". В качестве выпрямляющих барьеров могут быть сформированы барьеры Шоттки и Мотта. В результате получается  $m_1-p-n-m_2$ -структура, в которой  $m_1-p$ - и  $n-m_2$ -переходы оказываются соединенными последовательно, а  $p-n$ -переход — встречно. Она является двухсторонне чувствительной, поскольку обе поверхности являются фотоприемными. При подсветке любой из сторон возникает фототок.

При приложении внешнего напряжения в режиме прямого смещения  $p-n$ -перехода два металлополупроводниковых перехода входят в режим обратного смещения, причем ток в цепи будет ограничиваться током металлополупроводникового перехода с наибольшим сопротивлением (рис. 1).

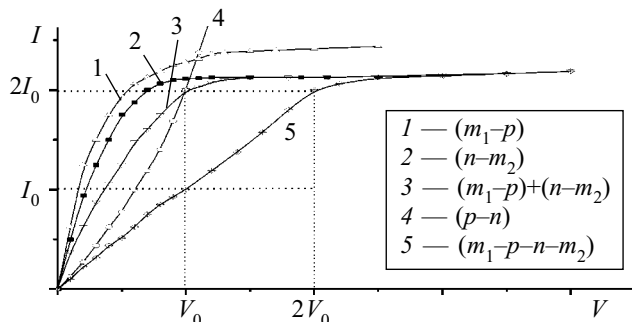


Рис. 1. Схематическая диаграмма вклада трех переходов в вольт-амперную характеристику для режима (+) $m_1-p-n-m_2(-)$

Процесс формирования токовой характеристики в трехбарьерной структуре модельно можно объяснить следующим образом. При прямом смещении  $p-n$ -перехода (рис. 1) два металлополупроводниковых перехода последовательно соединяются, переход с большим сопротивлением (кривая 1) ограничивает ток второго перехода (кривая 2), и в совмещенной кривой 3 имеем сумму напряжений, падающих на каждом переходе. Далее ток прямосмещаемого  $p-n$ -перехода (кривая 4) будет ограничиваться запираемыми барьерами (кривая 3), и в точке пересечения их вольт-амперных характеристик на каждый переход прикладывается напряжение, равное  $V_0$ . Сопротивление обратносмещаемых переходов становится равным сопротивлению прямосмещаемого  $p-n$ -перехода. То есть в трех переходах общее напряжение будет больше в два раза —  $2V_0$ , кривая 5.

В режиме обратного смещения  $p-n$ -перехода (рис. 2) ток определяется запираемым  $p-n$ -переходом, при этом два прямосмещаемых перехода "металл—полупроводник" (кривые 1 и 2) складываются как один (кривая 3).

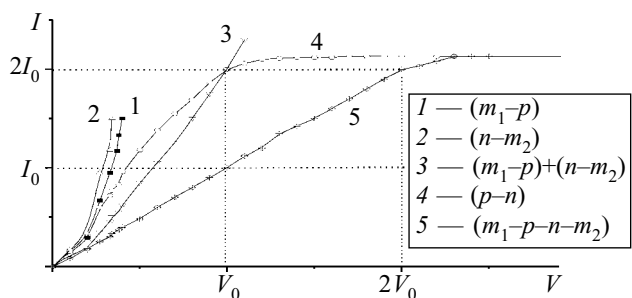


Рис. 2. Схематическая диаграмма вклада трех переходов в вольт-амперную характеристику для режима (-) $m_1-p-n-m_2(+)$

В результирующей кривой 3 для заданных токов имеем суммарные напряжения, падающие на каждом переходе. Далее ток прямосмещаемых переходов ограничивается запираемым  $p-n$ -переходом (кривая 4), и их вольт-амперные характеристики пересекаются при напряжении  $V_0$ , имея равные сопротивления. На самом деле в обратно-встречно-включенном режиме имеем суммарное напряжение  $2V_0$ , за пределами которого ток ограничивается запираемым  $p-n$ -переходом (кривая 5). В обоих режимах если на участке до точки перегиба вольт-амперной характеристики все три перехода определяют общий ток, то с увеличени-

ем напряжения постепенно происходит ограничение тока запираемым переходом. Вначале прямосмещаемый переход, затем запираемый барьер, и с момента, когда уже токи будут определяться сопротивлением перехода с наибольшим значением, появляется точка перегиба на вольт-амперной характеристике, и дальнейший ход формируется этим запираемым переходом. В составе разделяемых нами напряжений, падающих на прямо- и обратносмещаемых переходах, на самом деле в неявном виде содержатся части напряжений, падающих и на противоположных переходах. Таким образом, разделение является условным, и мы имеем дело с эффективными значениями падающего напряжения и условными прямым и обратным смещениями (рис. 1, 2).

Так как все переходы электрически соединены в единую цепочку и создают общее сопротивление

$$R_{\text{общ}} = R_1^{m_1-p} + R_2^{p-n} + R_3^{n-m_2}, \quad (1)$$

то при измерениях мы будем определять протекающий через них общий ток  $I_{\text{общ}}^{m_1-p-n-m_2}$  и общее напряжение, прикладываемое извне, которое распределяется между переходами в эффективном виде. В каждом из напряжений содержится часть напряжения, падающего на других переходах, т. к. их вклад в величину общего тока сводится к нулю (рис. 1).

$$V_{\text{общ}}^{m_1-p-n-m_2} = V_1^{m_1-p} + V_2^{p-n} + V_3^{n-m_2}. \quad (2)$$

В режиме прямосмещаемого  $p-n$ -перехода два последовательно включенных перехода находятся в режиме запираения. Можно сказать, имеем общий прямой ток  $I_{\text{общ,прям}}^{m_1-p-n-m_2}$  и общее прямое напряжение

$$V_{\text{общ,прям}}^{m_1-p-n-m_2} = V_{\text{пр}}^{p-n} + V_{\text{обр}}^{m_1-p} + V_{\text{обр}}^{n-m_2}, \quad (3)$$

а в режиме обратного смещения  $p-n$ -перехода — общий обратный ток  $I_{\text{общ,обр}}^{m_1-p-n-m_2}$  и общее обратное напряжение

$$V_{\text{общ,обр}}^{m_1-p-n-m_2} = V_{\text{пр}}^{m_1-p} + V_{\text{пр}}^{n-m_2} + V_{\text{обр}}^{p-n}. \quad (4)$$

Структуры с обратновключенными переходами могут быть симметричными и несимметричными. В металлополупроводниковых трехбарьерных структурах переходы считаются симметричными при равенстве сопротивлений:

$$R_{\text{пр}}^{p-n} + R_{\text{обр}}^{m_1-p} + R_{\text{обр}}^{n-m_2} = R_{\text{пр}}^{m_1-p} + R_{\text{пр}}^{n-m_2} + R_{\text{обр}}^{p-n}, \quad (5)$$

то есть  $R_{\text{общ}}^{\text{пр}} = R_{\text{общ}}^{\text{обр}}$ .

Независимо от характерных признаков симметричности структуры на практике определяется идентичным видом, т. е. совпадением электрических характеристик при смене полярности рабочего напряжения. При нарушении этих условий металлополупроводниковые переходы становятся несимметричными и появляется разность величин общих токов при прямых и обратных направлениях:

$$R_{\text{общ}}^{\text{пр}} \neq R_{\text{общ}}^{\text{обр}}. \quad (6)$$

Исследуемые трехбарьерные структуры таковы, что в них генерационные токи являются низкими — благодаря наличию барьера для неосновных носителей со стороны  $n$ -области, например барьера Мотта. При нулевом смещении и подсветке со стороны барьера Мотта имеем дырочный фототок, а при подсветке со

стороны барьера Шоттки (*p*-области) — электронный фототок. При этом с увеличением интенсивности освещения барьер для дырочного фототока становится прозрачным, и фоточувствительность возрастает.

В режиме запираемых переходов "металл—полупроводник" фоточувствительность с обеих поверхностей эффективна. При этом одновременное освещение обеих поверхностей способствует сложению генерируемых фототоков. В режиме обратного смещения *p-n*-перехода фоточувствительность обеспечивается в длинноволновой области спектра, а при возбуждении со стороны барьера Шоттки — начиная с коротковолнового диапазона.

Многобарьерность данной структуры приводит к следующим особенностям.

1. Ограничение рабочего тока обратновключенным переходом предотвращает преждевременный пробой любого из переходов.
2. Складываются рабочие напряжения.
3. В любом направлении реализуется фотодиодный режим.
4. При смене полярности рабочего напряжения попеременно функциональными становятся запираемый *p-n*-переход и металлополупроводниковые переходы, что позволяет управлять спектральным диапазоном.
5. Благодаря последовательному соединению трех барьеров увеличивается быстродействие.
6. Возможность увеличения протяженности электрического поля способствует повышению фоточувствительности.
7. Малые обратные токи по сравнению со структурами с одиночным барьером, двухсторонняя фоточувствительность и работоспособность в обоих направлениях рабочего напряжения делают трехбарьерные структуры многофункциональными.

**Расчет перераспределения напряжений на обратновключенных переходах трехбарьерных структур**

Характеристики двухбарьерных структур можно описать основываясь на модели Ван Опдорпа и Канервы, разработанной для двойных гетеропереходов *nGe-nSi* как двойных обратновключенных барьеров Шоттки [8, 9]. Нами на основе экспериментальной вольт-амперной характеристики двухбарьерной структуры определены напряжения, падающие отдельно на каждом переходе [15]. При этом принцип суммирования прямой и обратной ветвей выполнен для последовательно соединенных в единую цепочку прямоили обратновключенных барьеров Шоттки и *p-n*-перехода.

Природа токов, протекающих через барьер, определяется подвижностью носителей заряда и напряженностью электрического поля. Для образования барьера в полупроводниках типа  $A^3B^5$  концентрация носителей должна быть больше  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  [16]. Соответственно, напряженности электрических полей главным образом определяют обратные токи [17].

Однако при анализе трехбарьерных структур (как и двухбарьерных) необходимо учесть некоторые особенности. Если в двухбарьерной структуре в каждом из направлений мы имели лишь по одному запираемому

переходу, то в случае трехбарьерной структуры в любом из направлений к одному полупроводниковому барьеру встречно включаются два последовательно соединенных металлополупроводниковых перехода. Отношение сопротивлений этих отдельных переходов, независимо от режима рабочего напряжения, сохраняется начиная с точки перегиба вольт-амперной характеристики вплоть до предпробойной области, что равносильно отношению исходных электрических полей между ними:

$$\frac{R_3^{n-m_2}}{R_1^{m_1-p}} = \frac{E_3^0}{E_1^0}, \tag{7}$$

где  $E_3^0$  — электрическое поле *n-m<sub>2</sub>*-перехода, которое определяется отношением высоты потенциально-го барьера к толщине слоя объемного заряда —

$$E_3^0 = \frac{\Phi_3}{W_3^0} = \Phi_3^{n-m_2} / \left( \frac{2\epsilon\epsilon_0}{q} \frac{\Phi_3^{n-m_2}}{N_n} \right)^{1/2}; \tag{8}$$

$W_3^0$  — толщина слоя объемного заряда *n-m<sub>2</sub>*-перехода в равновесном состоянии;  $\Phi_3^{n-m_2}$  — высота потенциального барьера в *n-m<sub>2</sub>*-переходе;  $\epsilon, \epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника и вакуума, соответственно;  $E_1^0$  — электрическое поле *m<sub>1</sub>-p*-перехода —

$$E_1^0 = \frac{\Phi_1}{W_1^0} = \Phi_1^{m_1-p} / \left( \frac{2\epsilon\epsilon_0}{q} \frac{\Phi_1^{m_1-p}}{N_p} \right)^{1/2}. \tag{9}$$

Здесь сопротивление фактически представляет собой отношение напряжения к току. В свою очередь, прилаемое к барьеру напряжение приводит к расширению слоя обеднения обратно пропорционально концентрации носителей базовой области. Если сопротивления обоих переходов будут равными, то рабочее напряжение в режиме запираения барьеров увеличится в два раза, а при их различии будет определяться пределом перехода с наибольшим сопротивлением.

Используя экспериментальные данные зависимости тока от напряжения, можно оценить перераспределение напряжения между переходами трехбарьерной структуры.

В соответствии с электрической эквивалентной схемой (рис. 3), где центральный *p-n*-переход включен противоположно двум последовательно соединенным по отношению к прилаемому напряжению переходам *m<sub>1</sub>-p* и *n-m<sub>2</sub>*, трехбарьерные *m<sub>1</sub>-p-n-m<sub>2</sub>*-структуры сводятся к двухбарьерным структурам. Для этого один из последовательно включенных *m<sub>1</sub>-p*-барьеров можно расположить следом за *n-m<sub>2</sub>*-переходом, как показано на рис. 4. Тогда сопротивления

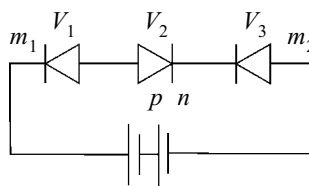


Рис. 3. Эквивалентная схема трехбарьерной структуры

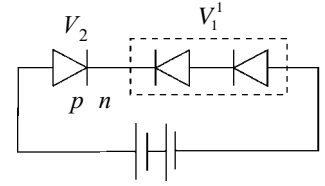


Рис. 4. Упрощенная эквивалентная схема трехбарьерной структуры, приведенной к двухбарьерной

первого и третьего переходов, представляющие собой последовательно соединенные барьеры Шоттки, можно принять как одно —

$$R_1^1 = R_1^{m_1-p} + R_3^{n-m_2}, \quad (10)$$

и  $p$ - $n$ -перехода — как  $R_2^{p-n}$ . Напряжение, падающее на переходе  $R_1^1$ , можно выразить как

$$V_1^1 = V_1^{m_1-p} + V_3^{n-m_2}. \quad (11)$$

Для случая, когда  $R_{\text{общ}}^{\text{пр}} \neq R_{\text{общ}}^{\text{обр}}$ , за счет  $N_p \neq N_n$ ,  $\phi_1 \neq \phi_2$  и  $V_1^{m_1-p} \neq V_3^{n-m_2}$ , пользуясь равенством токов, протекающих через все переходы,

$$I_{1(\text{обр})}^{m_1-p} = I_{2(\text{пр})}^{p-n} = I_{3(\text{обр})}^{n-m_2} = I_{\text{общ,прям}}^{m_1-p-n-m_2} \quad (12)$$

и учитывая особенности трехбарьерной структуры, отраженной в формуле (3), выведем формулы для определения перераспределения падающих напряжений  $V_1^{m_1-p}$ ,  $V_2^{p-n}$  и  $V_3^{n-m_2}$  на каждом из переходов в режиме прямого смещения  $p$ - $n$ -перехода.

В режиме прямого смещения  $p$ - $n$ -перехода до точки перегиба вольт-амперной характеристики имеем один прямосмещаемый переход и два последовательно соединенных барьера "металл—полупроводник", которые определяют ход кривой вольт-амперной характеристики.

Так как напряжение, приложенное извне, распределяется между прямо- и обратносмещенными переходами следующим образом —

$$R_1^1 \cdot V_2^{p-n} = V_1^1 \cdot R_2^{p-n}, \quad (13)$$

сначала определим напряжение, падающее на прямо- смещаемом переходе.

$$V_{2(\text{пр})}^{p-n} = \frac{R_{2(\text{пр})}^{p-n} \cdot V_1^1}{R_1^1}. \quad (14)$$

Здесь сопротивления  $R_{2(\text{пр})}^{p-n}$  и  $R_{1(\text{обр})}^1$  в точке перегиба вольт-амперной характеристики равны между собой, поэтому сопротивление каждого перехода равно половине общего сопротивления:

$$R_{2(\text{пр})}^{p-n} = \frac{R_{\text{общ(пр)}}^0}{2} = \frac{V_{\text{общ(пр)}}^0}{2I_{\text{общ(пр)}}^0}. \quad (15)$$

Тогда напряжение, падающее на  $p$ - $n$ -переходе, равно

$$V_{2(\text{пр})}^{p-n} = \frac{V_{\text{общ(пр)}}^0}{2I_{\text{общ(пр)}}^0} \cdot I_{\text{общ,прям}}^{m_1-p-n-m_2}. \quad (16)$$

Соответственно суммарное напряжение, падающее на запираемых последовательно соединенных металлополупроводниковых  $m$ - $p$ - и  $n$ - $m$ -переходах, определяется с помощью формул (2), (11) и (16):

$$V_{1(\text{обр})}^1 = V_{\text{общ,прям}}^{m_1-p-n-m_2} - V_{2(\text{пр})}^{p-n}. \quad (17)$$

С другой стороны, с учетом (7), (8), (9), решая уравнения (11) и (18)

$$\frac{V_3^{n-m_2}}{V_1^{m_1-p}} = \frac{E_3^0}{E_1^0}, \quad (18)$$

получим выражение, связывающее напряжение, падающее на одном из переходов,  $m_1$ - $p$ , с суммарным напряжением:

$$V_{1(\text{обр})}^{m_1-p} = V_{1(\text{обр})}^1 \cdot \frac{E_1^0}{E_1^0 + E_3^0}, \quad (19)$$

где  $\frac{E_1^0}{E_1^0 + E_3^0}$  — коэффициент, отражающий соотношение электрических полей между последовательно соединенными металлополупроводниковыми барьерами, причем

$$\left( \frac{E_1^0}{E_1^0 + E_3^0} \right)_{\text{пр}} = \left( \frac{E_1^0}{E_1^0 + E_3^0} \right)_{\text{обр}}. \quad (20)$$

Воспользовавшись формулой (11), определим напряжения, падающие на другом,  $n$ - $m_2$ -переходе:

$$V_{3(\text{обр})}^{n-m_2} = V_{1(\text{обр})}^1 - V_{1(\text{обр})}^{m_1-p}. \quad (21)$$

В режиме запираания  $p$ - $n$ -перехода, так же на основе равенства токов, протекающих через все переходы,

$$I_{1(\text{пр})}^{m_1-p} = I_{2(\text{обр})}^{p-n} = I_{3(\text{пр})}^{n-m_2} = I_{\text{общ,обр}}^{m_1-p-n-m_2} \quad (22)$$

и учитывая особенности трехбарьерной структуры, отраженной в формуле (4), выведем формулы для определения перераспределения падающих напряжений  $V_1^{m_1-p}$ ,  $V_2^{p-n}$  и  $V_3^{n-m_2}$  на каждом из переходов рис. 2. В этом режиме ход кривой после точки перегиба вольт-амперной характеристики определяется запираемым  $p$ - $n$ -переходом. Здесь сопротивления  $R_{2(\text{обр})}^{p-n}$  и  $R_{1(\text{пр})}^1$  в точке перегиба вольт-амперной характеристики равны между собой, поэтому сопротивление каждого перехода равно половине общего сопротивления. При этом получаем данные токов и напряжений  $V_0, I_0$  для этой ветви и из выражения (13) находим суммарные напряжения  $V_1^1$ , падающие на последовательно соединенных прямосмещаемых металлополупроводниковых  $m_1$ - $p$ - и  $n$ - $m_2$ -переходах:

$$V_{1(\text{пр})}^1 = \frac{V_{\text{общ(обр)}}^0}{2I_{\text{общ(обр)}}^0} \cdot I_{\text{общ,обр}}^{m_1-p-n-m_2}. \quad (23)$$

Учитывая соотношение (20), находим напряжения, падающие на прямосмещаемом  $m_1$ - $p$ -переходе,

$$V_{1(\text{пр})}^{m_1-p} = V_{1(\text{пр})}^1 \cdot \frac{E_1^0}{E_1^0 + E_3^0}, \quad (24)$$

и используя формулу (23), определяем напряжения, падающие на втором прямосмещаемом  $n$ - $m_2$ -переходе:

$$V_{3(\text{пр})}^{n-m_2} = V_{1(\text{пр})}^1 - V_{1(\text{пр})}^{m_1-p}. \quad (25)$$

Далее находим  $V_2^{p-n}$  в запираемом  $p$ - $n$ -переходе:

$$V_{2(\text{обр})}^{p-n} = V_{\text{общ(обр)}}^{m_1-p-n-m_2} - V_{1(\text{пр})}^1. \quad (26)$$

Для случая симметричной трехбарьерной структуры  $R_{\text{общ}}^{\text{пр}} = R_{\text{общ}}^{\text{обр}}$  значения падающих напряжений на отдельных переходах определяются с учетом равенства суммарных напряжений при смене полярности рабочего напряжения  $(V_{2(\text{пр})}^{p-n} + V_{1(\text{обр})}^1)_{\text{пр}} = (V_{1(\text{пр})}^1 + V_{2(\text{обр})}^{p-n})_{\text{обр}}$ .

$$V_{2(\text{пр})}^{p-n} + V_{1(\text{обр})}^1 = V_{\text{общ}}^{m_1-p-n-m_2}. \quad (27)$$

Коэффициент  $\frac{E_1^0}{E_1^0 + E_3^0}$  для симметричной трехбарьерной структуры рассчитывается на основе исходных данных каждого из переходов. Далее, учитывая

вычисленные значения коэффициента и формулу (27), с помощью формул (16), (17), (19), (21) определяем напряжения, падающие на  $p-n$ -переходе ( $V_{2(пр)}^{p-n}$ ), падающие на последовательно соединенных металлополупроводниковых переходах ( $V_{1(обр)}^1$ ), а также на отдельных  $m_1-p$ - и  $n-m_2$ -переходах ( $V_1^{m_1-p}$  и  $V_3^{n-m_2}$ ).

Перераспределение потенциала данным способом определяли на специально изготовленных трехбарьерных структурах. В качестве подложки выбрали  $nGaAs:O$  с концентрацией носителей  $N_m = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Гомопереходы  $pGaAs-nGaAs$  получили выращиванием из жидкой фазы эпитаксиального слоя  $pGaAs$ , легированного  $Zn$  до концентрации носителей  $N_p = 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Толщина пленок составляла 2—3 мкм. Напыляя в вакууме серебро на обе поверхности, изготовили “несимметричную” трехбарьерную  $Ag-pGaAs-nGaAs-Ag$ -структуру. В этих выпрямляющих контактах высота потенциального барьера  $Ag-pGaAs$   $\phi_1^{m_1-p} = 0,62 \text{ эВ}$ , а  $nGaAs-Ag$  —  $\phi_2^{n-m_2} = 0,88 \text{ эВ}$ . Высоты потенциальных барьеров определяли из зависимости корня квадратного из фотоотклика, пересчитанного на один фотон, от энергии фотона при поочередном освещении поверхностей, что согласуется с данными, приведенными в работе [18, с. 286—306]. Площадь структур доведена скрайбированием до  $5 \times 5 \text{ мм}^2$ .

Вольт-амперная характеристика исследуемой трехбарьерной  $m-pGaAs-nGaAs-m$ -структуры приведена на рис. 5. Токи и напряжения в точке перегиба ВАХ для режима прямого смещения  $p-n$ -перехода (кривая 1) составляют 0,057 мкА и 4 В, соответственно. С учетом этих данных на основе формул (16), (17), (19) и (21) вычислены значения напряжений  $V_{2(пр)}^{p-n}$ ,  $V_{1(обр)}^1$ ,  $V_1^{m_1-p}$ ,  $V_3^{n-m_2}$ .

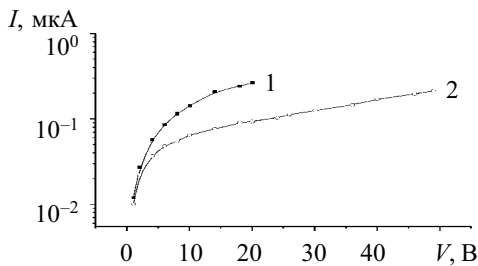


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика трехбарьерного  $m-pGaAs-nGaAs-m$ -фотодиода в режиме прямого (1) и обратного (2) смещения  $p-n$ -перехода

На основе полученных напряжений с помощью формул (34)—(36) рассчитаем толщины слоев объемного заряда запираемых металлополупроводниковых переходов.

$$W^{m_1-p} = \left( \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 (\phi_1^{m_1-p} + V_{1(обр)}^{m_1-p})}{q N_p} \right)^{1/2}; \quad (34)$$

$$W^{n-m_2} = \left( \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 (\phi_2^{n-m_2} + V_{3(обр)}^{n-m_2})}{q N_n} \right)^{1/2}. \quad (35)$$

На основе данных толщин слоев объемного заряда вычислим емкости и напряженности электрических полей для каждого перехода с помощью формул

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{W}; \quad (36)$$

$$E = \frac{V}{W}, \quad (37)$$

где  $S$  — площадь и  $W$  — толщина слоя объемного заряда.

Результаты расчета соответствующих параметров в режиме прямого смещения  $p-n$ -перехода приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры  $Ag-pGaAs-nGaAs-Ag$ -структуры в режиме прямого смещения  $p-n$ -перехода

$V_{общ}^{m_1-p-n-m_2}$	2	4	6	8	10	14	18	20
$I_{общ}^{m_1-p-n-m_2}$	0,027	0,057	0,086	0,115	0,143	0,208	0,241	0,265
$V_{2(пр)}^{p-n}$	0,95	1,99	3,02	4,04	5,02	7,3	8,46	9,3
$V_{1(обр)}^1$	1,05	2,01	2,98	3,96	4,98	6,7	9,35	10,7
$V_{1(обр)}^{m_1-p}$	0,72	1,39	2,06	2,73	3,44	4,6	6,45	7,4
$W^{m_1-p}$	4,9	6	6,9	7,76	8,5	9,69	11,28	12,01
$E, 10^5 \text{ В/см}$	0,27	0,34	0,39	0,43	0,48	0,54	0,63	0,67
$C, 10^{-9} \text{ Ф}$	11,1	9,1	7,9	7,02	6,4	5,62	4,83	4,53
$V_{3(обр)}^{n-m_2}$	0,33	0,62	0,92	1,23	1,54	2,1	2,9	3,3
$W^{n-m_2}$	12,3	13,7	15	16,3	17,5	19,4	21,8	22,9
$E, 10^5 \text{ В/см}$	0,098	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,17	0,18
$C, 10^{-9} \text{ Ф}$	4,43	3,97	3,63	3,34	3,1	2,8	2,49	2,38

Для режима обратного смещения  $p-n$ -перехода (рис. 5, кривая 2) токи и напряжения в точке перегиба ВАХ 0,022 мкА и 2 В, соответственно. На основе этих данных по формулам (23)—(26) вычислены значения напряжений  $V_{1(пр)}^1$ ,  $V_{1(пр)}^{m_1-p}$ ,  $V_{3(пр)}^{n-m_2}$  и  $V_{2(обр)}^{p-n}$ .

На основе полученных напряжений с помощью формул (36)—(38) рассчитаем толщину слоя объемного заряда, напряженность электрического поля и емкости для запираемого  $p-n$ -перехода:

$$W^{p-n} = \left( \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 (N_p + N_n) \cdot (V_k + V_{2(обр)}^{p-n})}{q N_p N_n} \right)^{1/2}, \quad (38)$$

где  $V_k$  — контактная разность потенциалов  $p-n$ -перехода.

На основе данных, приведенных в табл. 1, 2, можно установить механизмы токопереноса в каждом переходе, взаимосвязь хода толщины слоев объемного заряда, емкости с электрическими полями переходов. Так, с напряженностью электрического поля и диэлектрической проницаемостью прямо пропорционально связана емкость перехода. При последовательном соединении переходов общая емкость уменьшается. В наших структурах емкости трех переходов соединены последовательно, благодаря чему общая емкость имеет малые значения (см. табл. 1, 2).

Зависимость тока от напряжения в рассматриваемых трехбарьерных структурах в любом направлении описывается степенной зависимостью

$$I \approx V^\gamma. \quad (40)$$

Таблица 2

Параметры  $Ag-pGaAs-nGaAs-Ag$ -структуры в режиме обратного смещения  $p-n$ -перехода

$V_{\text{общ}}^{m_1-p-n-m_2}$ , В	2	6	10	14	20	30	40	50
$I_{\text{общ}}^{m_1-p-n-m_2}$	0,022	0,048	0,065	0,076	0,093	0,125	0,17	0,213
$V_{1(\text{np})}^1$ , В	0,99	2,18	2,96	3,46	4,23	5,69	7,74	9,69
$V_{1(\text{np})}^{m_1-p}$ , В	0,68	1,5	2,04	2,39	2,92	3,93	5,34	6,6
$V_{3(\text{np})}^{n-m_2}$ , В	0,31	0,68	0,92	1,07	1,31	1,76	2,4	3,09
$V_{2(\text{обр})}^{p-n}$ , В	1,01	3,82	7,04	10,54	15,8	24,3	32,26	40,31
$W^{p-n}$ , $10^{-5}$ см	17,4	26,6	34,1	40,9	49,3	60,5	69,3	77,2
$E$ , $10^5$ В/см	0,12	0,18	0,24	0,28	0,34	0,42	0,48	0,54
$C$ , $10^{-9}$ Ф	3,1	2	1,6	1,3	1,2	0,9	0,79	0,71

На основе значений показателя степени выясним механизмы образования токовых характеристик в запираемых переходах.

Как видно из рис. 6, во всех запираемых металл-полупроводниковых переходах с увеличением напряженности электрического поля наблюдаем уменьшение показателя степени от 1,0 до 0,5. Наблюдаемую зависимость можно объяснить постепенной сменой механизма термоэлектронной эмиссии на генерацию носителей в слое объемного заряда запираемого перехода.

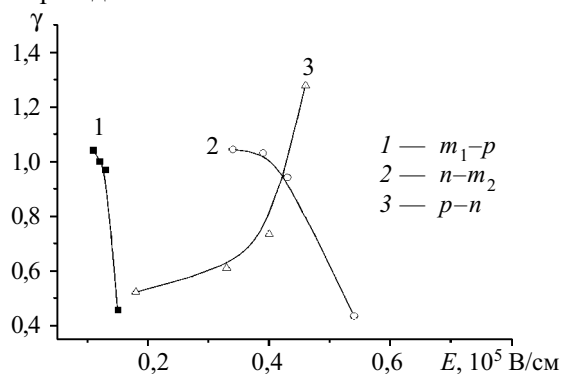


Рис. 6. Зависимость показателя степени от напряженности электрического поля в запираемых  $m_1-p$ - и  $n-m_2$ -переходах (1, 2) и в запираемом  $p-n$ -переходе (3)

При смене полярности прилагаемого извне напряжения имеем обратную закономерность, показатель степени в обратносмещенном  $p-n$ -переходе  $pGaAs-nGaAs$  с увеличением напряженности электрического поля начиная с 0,5 постепенно возрастает до 1,3, т. е. с увеличением напряжения механизм генерации носителей в слое объемного заряда сменяется термоэлектронной эмиссией.

В заключение можно отметить, что на основе напряжений, падающих на каждом переходе, можно установить процессы формирования токовых характеристик применительно к каждому переходу, установить взаимосвязь выходных характеристик с параметрами каждого из переходов. Расчеты показывают, что в обеих полярностях рабочего режима доминирующие переходы находятся в режиме запираения. Многофункциональность таких трехбарьерных структур заключается в том, что они, независимо от полярности прилагаемого напряжения, при возбужде-

нии с обеих сторон могут работать в фотодиодном режиме. То есть примененный подход определения напряжений, падающих на каждом переходе, может быть использован для изучения параметров подобных структур при оптическом и тепловом возбуждении.

**Заключение**

Таким образом, на основе вольт-амперных характеристик трехбарьерной структуры можно найти перераспределение потенциала между переходами, толщины слоев объемного заряда и напряженности электрических полей, емкости каждого из переходов, которые позволяют определить механизмы токопередачи и особенности фоточувствительности, частотные свойства.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Алферов Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // ФТП.— 2004.— Т. 38, вып. 8.— С. 937—947.
2. Аверин С. В. Определение характеристик контакта металл-полупроводник для встречно-штыревых фотодиодных структур // Письма в ЖТФ.— 1990.— Т. 16, вып. 4.— С. 49—53.
3. Ёдгорова Д. М., Якубов Э. Н. Детекторы оптического сигнала на основе структур  $Au-nSi-Al$ ,  $Au-nSi$  // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 4.— С. 39—42.
4. Пат. 933 РУз. Трехбарьерный фотодиод Каримова / А. В. Каримов.— 1994.
5. А. с. 676399 СССР. Трехбарьерный фотодиод Каримова / А. В. Каримов.— 1991.
6. Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Вахобов К. и др. Двухсторонне-чувствительные фотодиодные структуры в системе арсенид галлия—сульфид кадмия // Инженерно-физический журнал.— 2003.— Т. 76, № 1.— С. 167—169.
7. Каримов А. В. Фотозлектрическое усиление в трехбарьерной структуре // Лазерная техника и оптоэлектроника.— 1993.— № 3.— С. 83—85.
8. Каримов А. В. Трехбарьерный фотодиод // Там же.— 1991.— № 3.— С. 53—55.
9. Беляев А. П., Рубец В. П., Ташходжаев Х. А., Калинин И. П. Инверсия типа проводимости слоя селенида цинка в гетероструктуре // ФТП.— 1993.— Т. 27, № 3.— С. 527—532.
10. Mitchell K. W., Fahrenbruch A. L., Bube R. H. Evaluation of the CdS/CdTe heterojunction solar cell // J. Appl. Phys.— 1977.— Vol. 48, Issue 10.— P. 4365—4371.
11. Ушаков Н. М., Солодкий А. Н., Ведуц В. Э., Петросян В. И. Внутреннее фотоусиление в планарных структурах с барьером Бардина на GaAs // Письма в ЖТФ.— 1990.— Т. 16, вып. 1.— С. 17—21.
12. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов.— М.: Радио и связь, 1990.
13. Karimov A. V., Karimova D. A. Three-junction  $Au/AlGaAs(n)/GaAs(p)/Ag$  photodiode // Materials Science in Semiconductor Processing.— 2003.— Vol. 6.— P. 137—142.
14. Каримов А. В., Ёдгорова Д. М. Физические явления в арсенидгаллиевых структурах с микрослойным квазизопериодическим переходом.— Ташкент: Фан, 2005.
15. Ёдгорова Д. М., Каримов А. В. Определение характеристик двухбарьерных фотодиодных структур с металлполупроводниковыми переходами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 5.— С. 27—30.
16. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия.— М.: Мир, 1991.
17. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы.— М.: Энергоатомиздат, 1987.
18. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1.— М.: Мир, 1984.