

К. ф.-м. н. О. А. АБДУЛХАЕВ, д. т. н. Д. М. ЁДГОРОВА, д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, А. А. ЯКУБОВ, Ш. М. КУЛИЕВ

Узбекистан, г. Ташкент, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз

E-mail: karimov@uzsci.net

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХБАРЬЕРНОЙ ФОТОДИОДНОЙ GaAs-СТРУКТУРЫ

*Приведены результаты исследования механизма токопереноса и спектральной фоточувствительности трехбарьерной фотодиодной структуры  $m_1-p\text{GaAs}-n\text{GaAs}-m_2$  с эффектом смыкания двух смежных переходов, которая при обеих полярностях включения обладает высокой фоточувствительностью в «примесной» области спектра. Полученные результаты указывают на перспективность данных структур для применения в оптических системах связи.*

**Ключевые слова:** трехбарьерная фотодиодная структура, эффект смыкания, механизм токопереноса, фоточувствительность.

В настоящее время оптическая передача сигналов начинает вытеснять способы передачи информации с помощью электрических сигналов. Оптические методы передачи отличаются высокой помехоустойчивостью, большой скоростью передачи данных, возможностью передачи различных данных по одному кабелю. Прием и передача оптических сигналов осуществляется с помощью основных элементов — излучающего лазера или светодиода, светового волокна, а также приемника на основе фотодиода. Бурное развитие волоконно-оптических систем передачи информации обусловлено систематическим совершенствованием оптических волокон и оптических усилителей, что в свою очередь требует разработки соответствующих излучателей и фотоприемников [1]. Однако, хотя существующие принципы образования фототоков, а также виды приемников излучения и отличаются разнообразием, они все же не могут полностью удовлетворить возрастающие требования к фоточувствительности и спектральному диапазону. Для повышения эффективности приемников излучения разрабатываются различные модифицированные полупроводниковые структуры. Относительно фоточувствительности фоторезисторных структур [2] можно отметить, что за счет фотогенерации избыточных электронов и дырок в объеме полупроводника под воздействием света реализуется физический принцип фотопроводимости. Для этого должны быть выполнены следующие условия:

— для достижения относительного изменения сопротивления структуры не менее 10% длина образца должна быть как минимум в четыре раза больше диффузионной длины неосновных носителей заряда [3], поскольку иначе изменение сопротивления, определяемое темновым током, при освещении будет незначительным;

— наличие электрического поля в области линейного участка вольт-амперной характеристики;

— интенсивность возбуждающего сигнала должна быть меньше критической, чтобы люкс-амперная характеристика не выходила за пределы линейной области.

Проявляющиеся при этом фотоэффекты могут быть вызваны собственным или примесным поглощением, обусловленным переходами «зона — зона» или «примесный уровень — зона проводимости», «валентная зона — примесный уровень». То есть кванты света при поглощении могут перебрасывать электроны от атомов самого полупроводника или с примесных атомов. Эффект фотопроводимости ослабляется с увеличением уровня легирования полупроводников, а также с уменьшением толщины базовой области. Кроме того, фотодиод обладает большим быстродействием, чем фототранзистор [4].

В [5] при изготовлении лавинных  $p-i-n$  фотодиодов для уменьшения темнового тока было использовано охранный кольцо, препятствующее достижению  $p-n$ -перехода носителями заряда, генерированными на периферии кристалла. Однако при этом авторам работы не удалось решить другую проблему — уменьшить емкости структуры (<130 пФ). В [6] для уменьшения емкости фотодиода была изготовлена по-

*Работа выполнена при поддержке проекта ФА-Ф-5-020*

лупроводниковая пластина с гетероструктурой GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с разделенными чувствительной (диаметром 50 мкм) и контактной мезами, соединенными мостиковым фронтальным контактом. Автором [7] проведен обзор работ по лавинным  $p-i-n$ -фотодиодам на основе многослойных InGaAs-структур, которые рассчитаны на спектральный диапазон 1300 и 1550 нм, и показано, что здесь тоже остается нерешенной проблема снижения темновых токов.

В отличие от лавинных диодов, в многобарьерных структурах эти проблемы можно решить подбором параметров базовой области (более высокоомной) и выпрямляющего перехода, а также их конструкции. В этом аспекте представляет интерес создание многобарьерных фоточувствительных структур с интегрированными в единую структуру металлополупроводниковым и выпрямляющим переходами, что способствует повышению быстродействия и частотного диапазона.

В случае двухбарьерных структур база, являясь единственной при смене полярности рабочего напряжения, преимущественно модулируется поочередно сначала с одной стороны — в направлении от  $p$ -области к  $n$ -области, а затем с другой — от металла к  $n$ -области.

В [8] была показана возможность увеличения фоточувствительности планарных структур с двумя встречно включенными потенциальными барьерами Бардина по сравнению с диодными структурами. Они изготавливались на эпитаксиальном слое GaAs толщиной 10–14 мкм, выращенном на подложках из полупроводникового арсенида галлия. Расстояние между контактами равнялось 100 мкм. В качестве металла для барьера использовался алюминий. Фоточувствительность структуры увеличивалась с ростом рабочего напряжения и при 20 В достигала 1,5 А/Вт. Механизм наблюдаемого внутреннего усиления фототока объясняется образованием неоднородного распределения электрического поля и разделением генерированных светом носителей вблизи анода при одновременной дополнительной эмиссии электронов из катода.

В случае последовательно соединенного третьего барьера структура становится двухбазовой и открывает возможность изучения электронных процессов как при модуляции  $p-n$ -переходом одной базы, так и при одновременной модуляции обеих баз барьерами «металл — полупроводник». Кроме того, в режиме запирающего барьера Шоттки чувствительными являются обе поверхности. Можно также определить время жизни неосновных носителей заряда — электронов и дырок, поочередно освещая соответствующую

поверхность, что представляет интерес для объяснения физических особенностей электронных процессов в области объемного заряда многослойных структур.

Настоящая работа посвящена изучению физических особенностей электронных процессов, протекающих в области объемного заряда и в базовой области арсенид-галлиевых трехбарьерных фотодиодных  $m_1-p-n-m_2$ -структур при различных режимах включения, а также выявлению механизмов усиления первичного фототока и механизмов спектральной фоточувствительности и токопереноса.

### Образцы для исследований и методика эксперимента

Исследуемые трехбарьерные фотодиодные структуры создавались на основе GaAs, легированного кислородом по технологии получения резких  $p-n$ -переходов, выращиваемых из тонкого раствора-расплава жидкофазной эпитаксией гомослоя  $p$ -типа на подложке GaAs  $n$ -типа проводимости [9]. Концентрация носителей составляла  $7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$  в подложке и  $(5-7) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  в выращенном слое толщиной 1–2 мкм. Выпрямляющие переходы выполнялись напылением в вакууме полупрозрачных слоев Ag толщиной примерно 7 нм на обе поверхности.

Полученная фотодиодная структура представляет собой многослойную структуру, в которой центральный  $p-n$ -переход заключен между металлческими слоями, создающими выпрямляющий переход «металл — полупроводник», с соответствующими областями объемного заряда  $W_{m-p}$ ,  $W_{p-n}$  и  $W_{n-m}$  (рис. 1). В режиме пря-

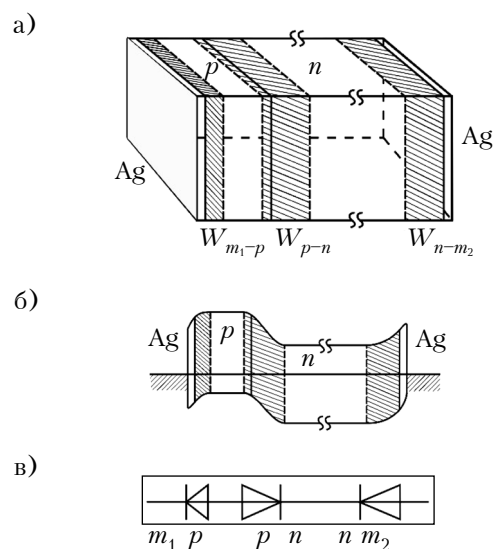


Рис. 1. Геометрическое изображение (а), энергетическая зонная диаграмма в равновесном состоянии (б) и эквивалентная схема (в) трехбарьерной фотодиодной структуры

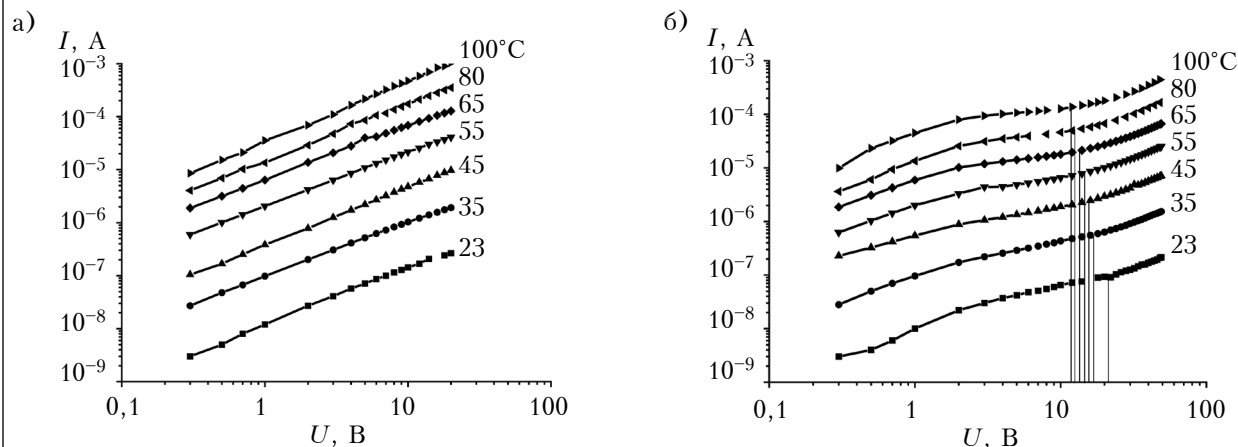


Рис. 3. ВАХ трехбарьерной фотодиодной структуры, полученные при различных значениях температуры и полярности внешнего напряжения:

*a* —  $(+)m_1-p-n-m_2(-)$ ; *б* —  $(-)m_1-p-n-m_2(+)$

ся степенная зависимость тока от напряжения с показателем степени 0,5, который обусловлен преобладанием генерационных процессов над диффузионными. Исследуемая структура, представляя собой три последовательно прямо и обратно соединенных барьера, при любой полярности рабочего напряжения имеет обратно смещенный переход, что приводит к превалированию свойств этого перехода над остальными при повышении рабочего напряжения. Поэтому функциональная зависимость тока от напряжения исследуемых структур также должна быть степенной с показателем степени 0,5, что и наблюдается на начальных участках ВАХ (кривая 2 на рис. 2, *a*). При увеличении напряжения, однако, ВАХ становится линейной, т. е. происходит переход в режим с постоянным омическим сопротивлением, что невозможно объяснить в рамках существующих представлений о барьерах [10].

Необычно также и то, что сопротивление структуры становится меньше при запираании двух крайних барьеров (кривая 1 на рис. 2, *б*). При этом в режиме запираания  $p-n$ -перехода на начальном участке при малых значениях напряжения наблюдается снижение сопротивления, которое сменяется линейным ростом до состояния насыщения (кривая 2). Такое поведение зависимости сопротивления исследуемой трехбарьерной структуры от напряжения можно объяснить следующим образом.

В исходном состоянии омическое сопротивление  $p-n$ -перехода больше, чем перехода «металл — арсенид галлия», поэтому в режиме прямого смещения  $p-n$ -перехода при увеличении прикладываемого внешнего напряжения наблюдается слабое нелинейное уменьшение сопротивления структуры, которое в дальнейшем приобретает неизменное значение. При смене полярности повышение начального напряжения приво-

дит к более ощутимому уменьшению сопротивления структуры, которое затем сменяется практически линейным ростом до 20 В, когда достигается практически постоянная величина, что на ВАХ соответствует линейному увеличению тока через структуру (кривая 2 на рис. 2).

Проведенные температурные исследования ВАХ структур показали, что механизм токопереноса в них не меняется с повышением температуры (рис. 3). Это свидетельствует о том, что причиной наблюдаемых особенностей является не модуляция протяженности базовой области, а изменение сопротивления структуры в «резисторной» области ВАХ, которое описывается как  $R_{\Omega}T \sim \exp[f(T^{-1})]$  (рис. 4) и соответствует термоэлектронному механизму токопереноса [10]. В режиме запираания  $p-n$ -перехода напряжение в точке излома ВАХ уменьшается при увеличении температуры (см. рис. 3, *б*).

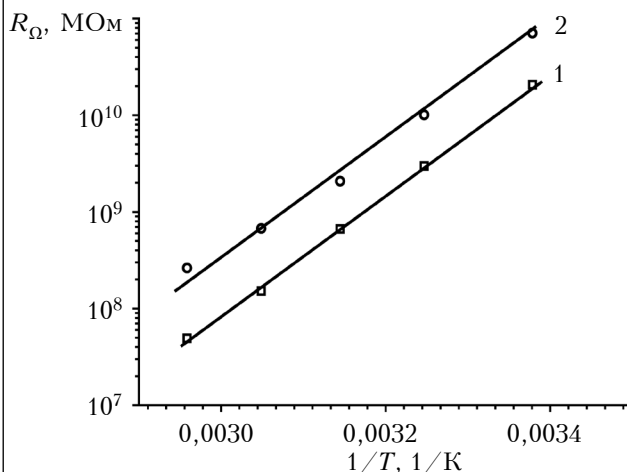


Рис. 4. Зависимость омического сопротивления трехбарьерной фотодиодной структуры от обратной температуры в резисторной области при различной полярности внешнего напряжения:

1 —  $(+)m_1-p-n-m_2(-)$ ; 2 —  $(-)m_1-p-n-m_2(+)$

мого смещения  $p-n$ -перехода оба выпрямляющих перехода «металл — полупроводник» находятся в режиме запираания, а в режиме запираания  $p-n$ -перехода выпрямляющие переходы оказываются включенными в прямом направлении. Обе поверхности являются фотоприемными. Эквивалентная схема фотодиода относительно рабочего напряжения состоит из одного прямо включенного перехода и одного обратно включенного.

Высота потенциальных барьеров, измеренная фотоэлектрическим методом, составляет 0,67 эВ и определяется фиксацией уровня Ферми поверхностными состояниями.

Были изготовлены трехбарьерные структуры  $m_1-p\text{-GaAs}-n\text{-GaAs}-m_2$  площадью 2–25 мм<sup>2</sup>, в которых переходы  $m_1-p$  и  $n-m_2$  физически соединены последовательно, а  $p-n$ -переход — встречно. Благодаря существованию запираемого перехода при любой полярности смещения, исследуемые структуры сохраняют работоспособность при смене полярности рабочего напряжения и являются двухсторонне чувствительными, т. е. фототок в них возникает при подсветке любой из сторон. Общая емкость структуры оказывается близкой к величине, определяемой ее геометрическими размерами, и составляет 0,2–0,5 пФ/мм<sup>2</sup>, что почти на порядок меньше по сравнению с известными фотодиодными структурами.

Исследуемая  $m_1-p-n-m_2$ -структура модельно аналогична тиристору, но отличается от него большей величиной одной из базовых областей (толщина  $n$ -области равна 350 мкм), в то время как в тиристоре три барьера разделены двумя базовыми областями с толщиной порядка диффузионной длины. При этом меньшая величина другой базовой области способствует смыканию смежных переходов до наступления режима лавинного умножения.

Для изучения электронных процессов в многослойных структурах с последовательно расположенными выпрямляющими переходами и слоями объемного заряда были проведены исследования их вольт-амперных (ВАХ), вольт-емкостных и спектральных характеристик. Исследования ВАХ проводили в соответствии с ГОСТ 18986.2-73. Базовая погрешность измерения напряжения составляла 0,05%. Вольт-емкостные характеристики исследуемых диодов измерялись на стандартной установке Л2-7. При малых значениях емкости (пФ) включался высокочастотный генератор, а при больших — низкочастотный. Погрешность измерения составляла 10%.

### Токовые характеристики трехбарьерной структуры

Исследуемая структура содержит три перехода: один центральный полупроводниковый  $p-n$ -переход и два потенциальных барьера «металл — полупроводник» с большой высотой барьера.

Как показали исследования, измеренные ВАХ несут типичный для структур с тремя последовательно соединенными барьерами характер в области изменения начального напряжения до некоторого порогового значения  $U_0$ , а при его превышении зависимости становятся линейными, что свойственно резисторным структурам (рис. 2, а). При этом следует отметить, что даже в области «резисторной зависимости» проявляются диодные свойства (возникновение фото-эдс, большое сопротивление структуры, малая зависимость емкости от полярности напряжения), что свидетельствует о существовании потенциальных барьеров в данной структуре. Согласно теории, в запираемых переходах арсенид-галлиевых структур должна наблюдаться

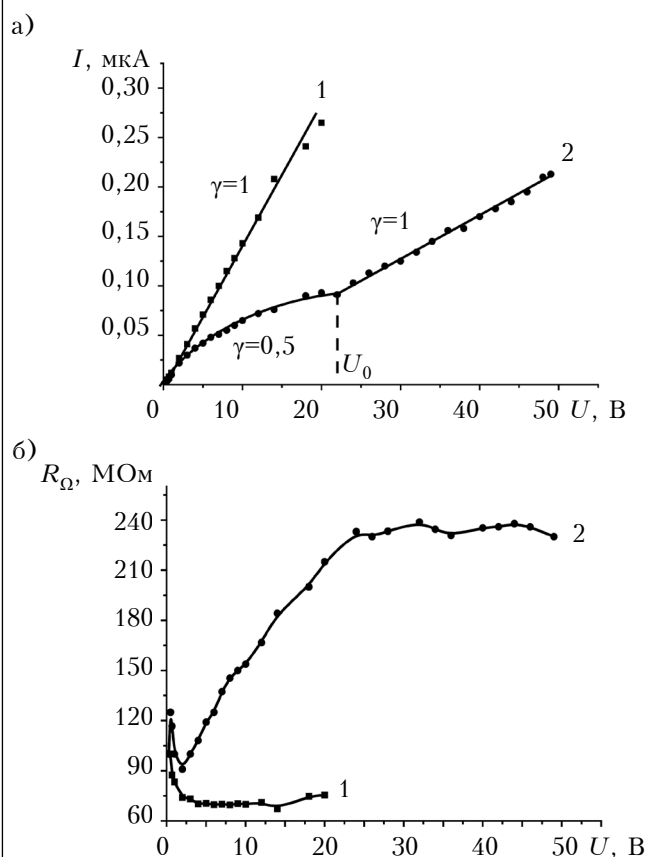


Рис. 2. Зависимости тока  $I$  (а) и омического сопротивления  $R_{\Omega}$  (б) трехбарьерной фотодиодной структуры от напряжения при различной полярности внешнего напряжения:

1 — (+) $m_1-p-n-m_2$ (-); 2 — (-) $m_1-p-n-m_2$ (+)

Заметим, что в исследуемой структуре одна из двух базовых областей  $p$ -типа имеет малую толщину, что приводит к смыканию двух смежных переходов при повышении напряжения. Поскольку напряжение смыкания слабо зависит от температуры, можно предположить, что точка излома ВАХ связана со смыканием смежных переходов трехбарьерной структуры с учетом перераспределения потенциала между запираемым  $m-p$ -переходом и высокоомной длинной  $n$ -областью. Как известно, при смыкании переходов токоперенос через них определяется неосновными носителями, в нашем случае электронами, преодолевающими  $p$ -область. Однако в исследуемой структуре их поток ограничивается барьерами «металл — полупроводник», поэтому после смыкания токоперенос через структуру определяется термоэлектронной эмиссией электронов из металла в полупроводниковую область, что и приводит к изменению показателя степени в функциональной зависимости тока от напряжения от 0,5 к 1.

#### Фотоэлектрические характеристики трехбарьерной структуры

При освещении структуры интегральным освещением зависимость фототока  $I_{ph}$  трехбарьерной структуры от напряжения является возрастающей (кривые 1, 2 на рис. 5), в отличие от идеального фотодиода с одним  $p-n$ -переходом (сплошная кривая), что связано с внутренним фотоэлектрическим усилением.

Так в режиме прямого смещения  $p-n$ -перехода, то есть в условиях запирающего перехода «металл — полупроводник», фототок больше, чем в случае запирающего  $p-n$ -перехода.

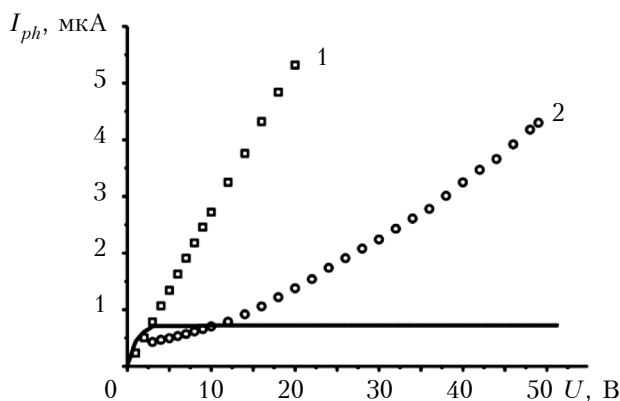


Рис. 5. Зависимость фототока трехбарьерной фотодиодной структуры от напряжения при различной полярности внешнего напряжения:

1 —  $(+)m_1-p-n-m_2(-)$ ; 2 —  $(-)m_1-p-n-m_2(+)$   
(сплошная линия — зависимость для идеального фотодиода с одним  $p-n$ -переходом, токовая фоточувствительность  $S_{\phi}^I = 7 \cdot 10^{-2}$  мкА/лк)

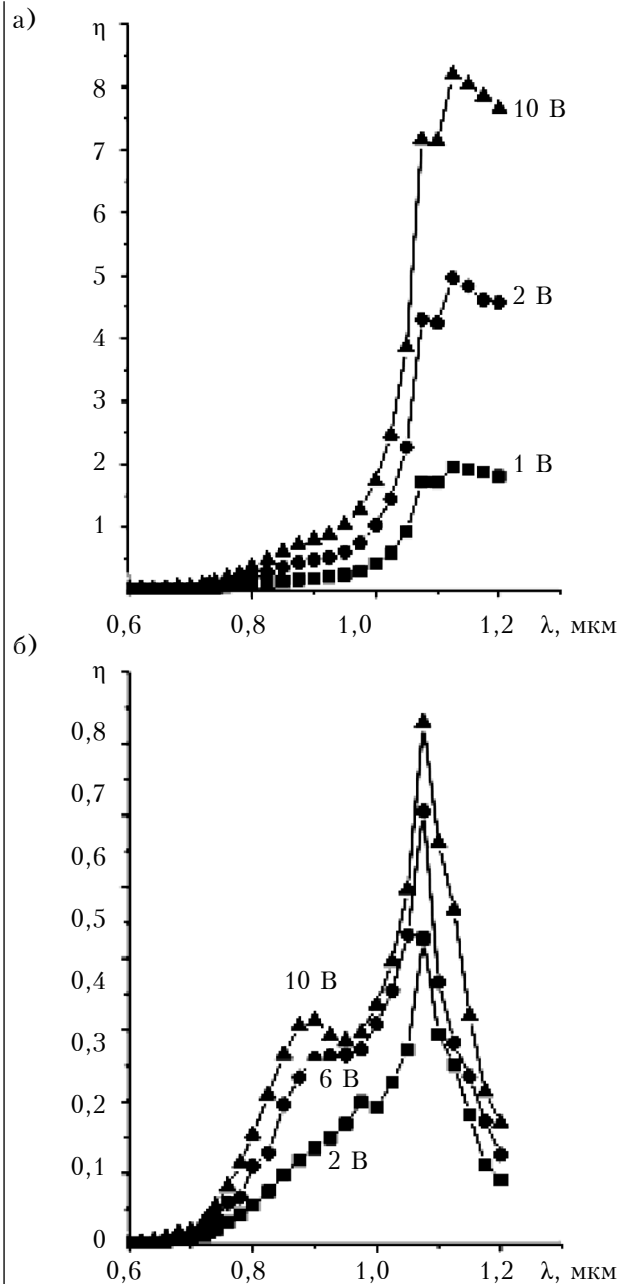


Рис. 6. Спектральные характеристики трехбарьерной фотодиодной структуры при различных значениях внешнего напряжения и его полярности:

а —  $(+)m_1-p-n-m_2(-)$ ; б —  $(-)m_1-p-n-m_2(+)$

Квантовая эффективность  $\eta$  исследуемой трехбарьерной фотодиодной структуры, определенная из спектральных характеристик, приведена на рис. 6. Из рисунка видно, что по мере увеличения напряжения от 2 до 10 В в режиме прямого смещения  $p-n$ -перехода квантовая эффективность увеличивается примерно до 8 (рис. 6, а), в то время как в режиме запирающего  $p-n$ -перехода — лишь до 0,7 (рис. 6, б), что указывает на присутствие внутреннего усиления в первом случае. При этом в режиме прямого смещения спектральная фоточувстви-

тельность достигает максимума в «примесной» области спектра при  $\lambda \approx 1,1$  мкм, а в случае за-  
пираания  $p-n$ -перехода она возрастает в ко-  
ротковолновой области спектра до  $\lambda \approx 0,9$  мкм,  
т. е. в разделении фотоносителей принимают  
участие имеющиеся в базовой области примес-  
ные уровни кислорода.

Следует отметить, что при определении  
квантовой эффективности учитывали чис-  
ло падающих фотонов, а не поглощенных.  
Соответственно, полученные нами значения  
квантовой эффективности являются несколько  
заниженными. Несмотря на это, полученное зна-  
чение квантовой эффективности больше едини-  
цы, что указывает на наличие внутреннего уси-  
ления в исследуемой структуре.

### Заключение

Установлено, что в трехбарьерной структу-  
ре  $m_1-p-n-m_2$  при повышении напряжения  
до точки излома вольт-амперной характери-  
стики имеет место ограничение дырочного тока, и  
ток, протекающий через структуру, определя-  
ется генерируемыми в области объемного заря-  
да  $p-n$ -перехода носителями, а после смыкания  
двух смежных переходов токоперенос определя-  
ется двухсторонней термоэлектронной эмиссией,  
т. е. поток дырок ограничен левым барьером, а  
поток электронов — правым. Экспериментально  
показано, что арсенид-галлиевая тонкобазовая  
трехбарьерная структура благодаря эффекту смы-  
кания и наличию высокоомной коллекторной об-  
ласти обладает высокой фоточувствительностью,  
подобно фоторезисторной структуре, при этом из-  
менение сопротивления в ней связано с перерас-  
пределением напряжения. Высокий (больше еди-  
ницы) внешний квантовый выход свидетельству-  
ет о внутреннем усилении первичного фототока.

Высокая чувствительность исследованной  
структуры в спектральной области 0,9 и 1,1 мкм  
и простота изготовления указывает на перспек-

тивность ее применения в телекоммуникацион-  
ных оптических системах как альтернативы тра-  
диционным фотоприемникам на основе InGaAs.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Абдулхаев О.А., Ёдгорова Д.М., Каримов А.В.,  
Кулиев Ш.М. Высокочувствительный фотоприемник на  
основе германиевой двухбарьерной структуры с эффектом  
смыкания // Технология и конструирование в электрон-  
ной аппаратуре. — 2015. — №4. — С. 24–27.
2. Амброзьяк А. Конструкция и технология полупрово-  
дниковых фотоэлектрических приборов. — Москва: Сов.  
радио, 1970.
3. Батавин В.В. Контроль параметров полупроводнико-  
вых материалов и эпитаксиальных слоев. — Москва: Сов.  
радио, 1970.
4. Вартанян С.П. Оптоэлектронные приборы и устройства  
в полиграфии. Глава 2. Элементная база оптоэлектронных  
приборов и устройств. — Москва: Издательство МГУП, 2000.  
(<http://hi-edu.ru/e-books/xbook138/01/part-003.htm>)
5. Добровольский Ю.Г., Ашеулов А.А. Кремниевый  
 $p-i-n$ -фотодиод с малым темновым током // Технология  
и конструирование в электронной аппаратуре. — 2011. —  
№ 3. — С. 27–31.
6. Андреев И. А., Серебренникова О. Ю., Соколовский  
Г. С. и др. Быстродействующие фотодиоды для средней  
инфракрасной области спектра 1,2–2,4 мкм на основе ге-  
тероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с полосой про-  
пускания 2–5 ГГц // Физика и техника полупроводни-  
ков. — 2013. — Т. 47, вып. 8. — С. 1109–1115.
7. Campbell J. C. Recent advances in telecommunications  
avalanche photodiodes // Journal of Light Wave  
Technology. — 2007. — Vol. 25, N 1. — P. 109–121. —  
<https://doi.org/10.1109/JLT.2006.888481>
8. Ушаков Н.М., Солоцкий А.Н., Ведущ 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.
9. Grigoryan G. E., Poghosyan L. N., Khudaverdyan S. Kh.  
The creation and investigation of photoelectric features of the  
double-barrier structures with narrow recrystallized base // Mater.  
of the Conf. on Optoelectronic and Microelectronic  
Materials and Devices DEEE. The University of Western  
Australia. — 1998. — P. 242–244.
10. Chu J. L., Sze S.M. Microwave Oscillation in pnp  
Reach-Through BARITT Diodes // Solid-State Electronics. —  
1973. — Vol.16. — P. 85. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(73\)90128-7](https://doi.org/10.1016/0038-1101(73)90128-7)

Дата поступления рукописи  
в редакцию 27.04 2018 г.

О. А. АБДУЛХАЙ, Д. М. ЙОДГОРОВА, А. В. КАРИМОВ, А. А. ЯКУБОВ, Ш. М. КУЛИЕВ

Узбекистан, м. Ташкент, Фізико-технічний інститут НВО «Фізика-Сонце» АН РУз

E-mail: karimov@uzsci.net

## ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЬОХБАР'ЄРНОЇ ФОТОДІОДНОЇ GaAs-СТРУКТУРИ

Роботу присвячено вивченню фізичних особливостей електронних процесів, що протікають в області  
об'ємного заряду і в базовій області арсенід-галієвих трьохбар'єрних фотодіодних структур  
 $m_1-p-GaAs-n-GaAs-m_2$  за різних режимів включення, а також виявлення механізмів посилення первин-  
ного фотоструму і механізмів спектральної фоточутливості і струмопереносу, що представляє інтерес  
для використання в оптичних системах. Експериментально показано, що досліджувана структура за-  
вдяки ефекту змикання двох суміжних переходів і наявності високоомної колекторної області має ви-  
соку фоточутливість, подібно фоторезисторній структурі, при цьому зміна опору в ній пов'язана з  
перерозподілом напруги. Високий зовнішній квантовий вихід (більше одиниці) свідчить про внутрішнє по-  
силення первинного фотоструму. Експериментально показано, що фоточутливість структури в режимі  
прямого зміщення  $p-n$ -переходу більше, ніж в режимі його замикання, а максимальна фоточутливість  
досягається в «домішковій» області спектра, тобто в розподілі фотоносіїв беруть участь наявні в  
базовій області домішкові рівні кисню. Залежність струму від напруги описується ступеневою функцією

з показником ступеня 0,5, відповідним генераційно-рекомбінаційному процесу в області об'ємного заряду  $p-n$ -переходу. Отримані результати вказують на перспективність даних структур для застосування в оптичних системах зв'язку.

**Ключові слова:** трьохбар'єрна фотодіодна структура, ефект змикання, механізм токопереносу, фоточутливість.

DOI: 10.15222/TKEA2018.4.21  
UDC 621.315.592.2:546.681'19

O. A. ABDULKHAEV, D. M. YODGOROVA, A. V. KARIMOV,  
A. A. YAKUBOV, Sh. M. KULIYEV

Physical-Technical Institute, Scientific Association Physics-Sun,  
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan  
E-mail: karimov@uzsci.net

## ELECTROPHYSICAL AND PHOTOELECTRIC CHARACTERISTICS OF A THREE-BARRIER PHOTODIODE GaAs STRUCTURE

The work is devoted to the study of physical features of electronic processes taking place in the space charge region and in the base region of arsenide-gallium three-barrier photodiode structures with the effect of locking two adjacent transitions. The structures have high photosensitivity in the «impurity» region of the spectrum at both inclusion polarities. The obtained results suggest that such structures can be used in optical communication systems. The study allowed showing that a three-barrier photodiode  $m_1-p\text{-GaAs}-n\text{-GaAs}-m_2$ -structure with a high quantum efficiency can exceed 8 times the photosensitivity of a photodiode as compared to a photodiode with a single  $p-n$  junction. In the  $m_1-p\text{-GaAs}-n\text{-GaAs}-m_2$  photodiode structure, the maximum photosensitivity is achieved in the impurity region of the spectrum (above  $1.0\text{ }\mu\text{m}$ ) when excitation of nonequilibrium current carriers through the barrier to the semiconductor, in contrast to the intrinsic spectral region ( $0.86\text{ }\mu\text{m}$ ). It has been shown experimentally that the photosensitivity of the structure in the direct-displacement mode of the  $p-n$  junction is larger, compared with the locking mode, and the maximum photosensitivity is achieved in the impurity region of the spectrum. That is, the impurity levels of oxygen present in the base region take part in the separation of the photocarriers. The dependence of the current on the voltage is described by a power function with an exponent of 0.5 corresponding to the generation-recombination process in the space-charge region of the  $p-n$  junction.

**Keywords:** three-barrier photodiode structure, clamping effect, current transfer mechanism, photosensitivity.

### REFERENCES

1. Abdulkhaev O.A., Yodgorova D.M., Karimov A.V., Kuliye Sh.M. [High-sensitivity photodetector based on a germanium double-barrier structure with a closing effect]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 2015, no 4, pp. 24-27.
2. Ambrozyak A. *Konstruktsiya i tekhnologiya poluprovodnikovyykh fotoelektricheskikh priborov* [The design and technology of semiconductor photovoltaic devices]. Moscow, Sov. Radio, 1970, 392 p. (Rus)
3. Batavin V.V. *Kontrol' parametrov poluprovodnikovyykh materialov i epitaksial'nykh sloyev* [Control parameters of semiconductor materials and epitaxial layers]. Moscow, Sov. Radio, 1976, 102 p. (Rus)
4. Vartanyan S.P. *Optoelektronnyye pribory i ustroystva v poligrafii. Glava 2. Elementnaya baza optoelektronnykh priborov i ustroystv* [Optoelectronic devices and devices in printing]. Moscow, Publishing house MSUP, 2000, 187 p. (<http://hi-edu.ru/e-books/xbook138/01/part-003.htm>) (Rus)
5. Dobrovolskiy Yu. G., Ashcheulov A. A. Silicic  $p-i-n$ -photodiode with small dark current. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2011, no. 3, pp. 27-31. (Rus)
6. Andreev I.A., Serebrennikova O.Y., Sokolovskii G.S. et al. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, iss. 8, pp. 1103-1109. <https://doi.org/10.1134/S1063782613080046>
7. Joe C. Campbell. Recent advances in telecommunications avalanche photodiodes. *Journal of Light Wave Technology*, 2007, vol. 25, iss. 1, pp. 109-121. <https://doi.org/10.1109/JLT.2006.888481>
8. Ushakov N.M., Solotsky A.N., Vedus V.E., Petrosyan V.I. [Inner photo intensification in planar structures with a Bardeen barrier on GaAs.] *Pisma v ZhTPh*, 1990, vol. 16, iss. 1, pp.17-21. (Rus)
9. Grigoryan G. E., Pogosyan L. N., Khudaverdyan S. Kh. The creation and investigation of photoelectric features of the double-barrier structures with narrow recrystallized base. Materials of the Conf. on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices DEEE. The University of Western Australia, 1998, pp. 242-244.
10. Chu J. L., Sze S.M. Microwave Oscillation in pnp Reach-Through BARITT Diodes. *Solid-State Electronics*, 1973, Vol.16, pp. 85. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(73\)90128-7](https://doi.org/10.1016/0038-1101(73)90128-7)

### Описание статьи для цитирования:

Абдулхаев О. А., Ёдгорова Д. М., Каримов А. В., Якубов А. А., Кулиев Ш. М. Электрофизические и фотоэлектрические характеристики трехбарьерной фотодиодной GaAs-структуры. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, №4, с. 21-27. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.21>

### Cite the article as:

Abdulkhaev O.A., Yodgorova D.M., Karimov A.V., Yakubov A.A., Kuliye Sh.M. Electrophysical and photoelectric characteristics of a three-barrier photodiode GaAs structure. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 4, pp. 21-27. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.21>