

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ БАРЬЕРОВ НА МЕХАНИЗМЫ ТОКОПЕРЕНОСА ВО ВСТРЕЧНОВКЛЮЧЕННЫХ ДВУХБАРЬЕРНЫХ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУРАХ

О.А. Абдулхаев, Г.О. Асанова, Д.М. Ёдгорова, Э.Н. Якубов, А.В. Каримов

Физико-технический институт НПО "Физика-Солнце" АН РУз (Ташкент)

Узбекистан

Поступила в редакцию 08.08.2011

Приведены результаты исследования механизмов токопереноса кремниевой фотодиодной Au-nSi-Al-структуры в зависимости от общего напряжения и падающих на каждом переходе напряжений. Экспериментально установлено, что различие свойств встречновключенных потенциальных барьеров приводит к изменению полевых и емкостных зависимостей при смене полярности рабочего напряжения, а сравнительно высокое удельное сопротивление базовой области (1000 Ом·см) приводит к генерационному механизму токопереноса в запираемом переходе и термоэлектронному механизму токопереноса в прямосмещаемом переходе.

Полученные результаты являются полезными при оптимизации фотоэлектрических характеристик кремниевых фотодиодных структур с переходом металл-полупроводник.

Ключевые слова: потенциальный барьер, токоперенос, встречновключенный, двухбарьерная структура.

Наведено результати дослідження механізмів струмопереноса кремнієвої фотодіодної Au-nSi-Al-структури залежно від загальної напруги й падаючих на кожному переході напруг. Експериментально встановлено, що розходження властивостей зустрічновімкннутих потенційних бар'єрів призводить до зміни польових і ємнісних залежностей при зміні полярності робочої напруги, а порівняно високий питомий опір базової області (1000 Ом·см) призводить до генерацийного механізму струмопереноса в замикаємому переході і термоелектронному механізмі струмопереносі в прямозміщеному переході.

Отримані результати є корисними при оптимізації фотоелектричних характеристик кремнієвих фотодіодних структур з переходом метал-напівпровідник.

Ключові слова: потенційний бар'єр, струмоперенос, зустрічновімкнутий, двохбар'єрна структура.

The results of research the charge transport mechanisms of silicon photodiode Au-nSi-Al-structure depending on the general voltage and voltages which are falling on each junction. Experimentally established that the difference in the properties of oppositely included potential barriers leads to a change in the field and capacitive dependencies by changing the polarity of the bias voltage, and the relatively high resistivity of base region (1000 Om·cm) results in the generation mechanism of charge transport in a reverse biased junction and the thermoelectronic mechanism of charge transport in directly biased junction.

The results are useful in optimizing of the photoelectric characteristics of silicon photodiode structures with a metal-semiconductor interface.

Keywords: Potential barrier, charge transport, oppositely included, two-barrier structure.

Успехи в разработке полупроводниковых лазеров и светодиодов с широким набором типонаминалов требуют разработки согласованных с ними фотоприемников не только на основе арсенида галлия, но и на основе широко освоенного кремния [1]. Интерес к кремнию обусловлен с уникальным сочетанием его свойств, а также высоким уровнем технологии получения, как самого материала, так

и приборов на его основе. Дальнейшее развитие кремниевой технологии и разработка новых структур на основе кремния, особенно фотоэлектрических приборов типа фотодиода и фототранзисторов являются актуальной задачей. Развивающиеся в настоящее время направления по разработке фотодиодов можно классифицировать на три основных направления. Это микроминиатюризация с при-

менением гетеропереходов для получения лавинных и инжекционных фотодиодов, усовершенствование фотодиодных структур с планарными контактами металл-полупроводник, создание структур фотодиодов с интегрированными полупроводниковым и металлополупроводниковым переходами [2 – 6].

Эффективные лавинные гетерофотодиоды InGaAsP/InP с *p-n*-переходом в InP были предложены в работе [7], а в работе [8] на основе GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb получены *p-i-n*-фотодиоды чувствительные в 0.9 – 2.4 мкм области спектра, площади которых были сведены до 100×100 мкм для уменьшения емкости и темновых токов. Чувствительные в длинноволновой ИК области спектра фотодиодные структуры с эффектом усиления фототока были предложены на изотипных гетероструктурах n^+ -GaSb- n^0 -GaInAsSb- n^+ -GaAlAsSb в работе [9], в них максимальные фототоки получены при фиксированных значениях рабочего напряжения, когда имеет место двойная инжекция носителей. В данном направлении ведутся исследования по оптимизации параметров получаемых фотодиодных структур.

На полупроводниковых структурах полученных выращиванием тонких эпитаксиальных слоев GaAs и GaInAs на полуизолирующих подложках разрабатываются фотодиодные структуры с встречновключенными планарными выпрямляющими барьерами металл-полупроводник на спектральный диапазон 1.0 – 1.3 мкм. Ведутся работы [10], по повышению их быстродействия и уменьшению темновых токов.

Путем интегрирования *p-n*-перехода и переходов металл-полупроводник получены трехбарьерные фотодиодные Au-*n*InGaAs-*p*GaAs-Ag-структуры с высокой fotocувствительностью (20 А/Вт) [2], тонкобазовые фотодетекторные *p*GaAs-*n*InGaAs-*m*-структуры [3], инжекционно-полевые фотодиоды с длинной базовой областью с гетеропереходом *p*AlGaInAs-*n*GaAs-Au [4], двухбазовые фотодиодные Ag-NAlGaAs- n^+ GaAs-*n*GaInAs-Au-структуры с барьером металл-полупроводник [5], *n*GaAs-*p*GaAs-Ag-структуры с диффузионным *n-p*-переходом [6]. В них изучены механизмы токопереноса и особенности

фоточувствительности в зависимости от рабочего режима, процессы модуляции толщины базовой области запираемыми барьерами. Ведутся работы по исследованию принципиальных возможностей структур с интегрированными переходами при использовании в качестве материала структуры кремния и соединений A^2B^6 .

В настоящей работе приведены результаты по исследованию токовых характеристик кремниевых фотодиодных структур на основе перехода металл-полупроводник-металл.

Исследуемые структуры изготовлены на основе монокристаллического кремния *n*-типа проводимости легированного фосфором с удельным сопротивлением 1000 Ом·см и концентрацией носителей $3.6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ с толщиной 600 мкм. С целью изучения генерационно-рекомбинационных процессов в базовой области структуры нами были получены потенциальные барьеры на обе поверхности *n*Si, так как при омических контактах к *n*Si структура превращается в резистор. Для получения выпрямляющих контактов к *n*Si наносили полупрозрачные слои Au толщиной ~100 Å на одну поверхность и Al на другую поверхность напылением в вакууме $\sim 10^{-5}$ торр. Геометрия полученной двухбарьерной Au-*n*Si-Al-структуры с встречновключенными переходами приведена на рис. 1а, также показана ее эквивалентная схема, рис. 1б. Высота потенциального барьера перехода Au-*n*Si определенная из спектральных характеристик составляет $\phi_{Au} = 0.8$ эВ, а для перехода *n*Si-Al $\phi_{Al} = 0.6$ эВ. На основе данных концентрации носителей и эффективной плотности состояний в зоне проводимости кремния $N_c = 2.8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ определяли положение

уровня Ферми: $E_F = E_C - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right)$, кото-

рое оказалось равным 0.7 эВ. Соответственно разность между зоной проводимостью и уровнем Ферми равна 0.4 эВ или разности между высотой барьера и этой величиной дают значения контактной разности потенциа-

лов для Au-*n*Si-перехода $U_k^{Au-nSi} = 0.8 - 0.4 = 0.4$ эВ, а для *n*Si-Al-перехода $U_k^{nSi-Al} = 0.6 -$

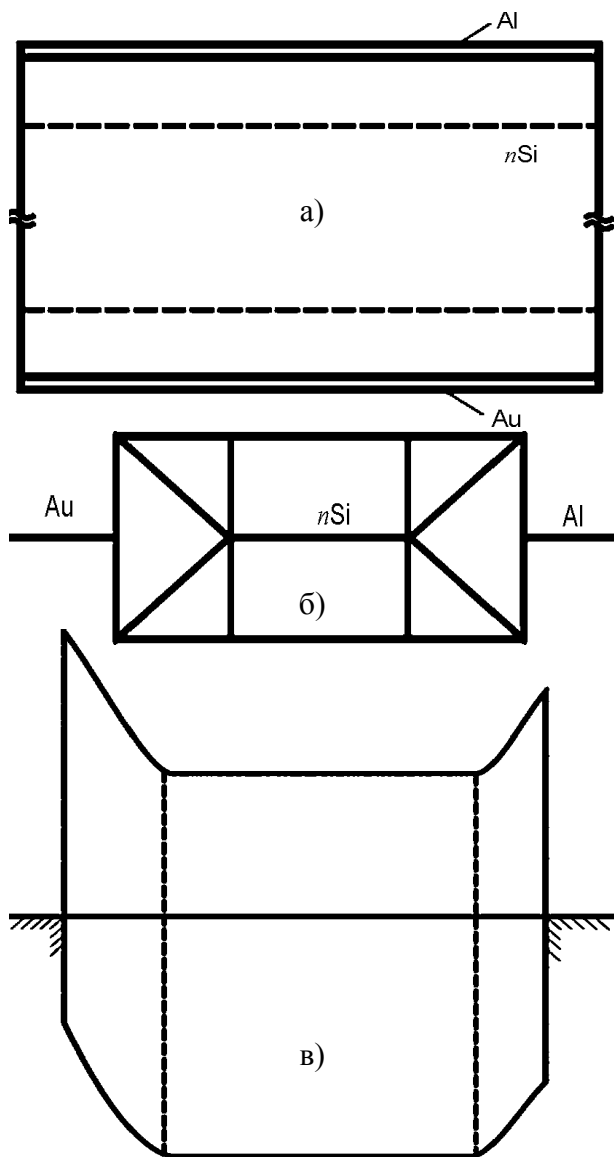


Рис. 1. Геометрическая конструкция (а) и эквивалентная схема (б), а также качественная зонная диаграмма Au-nSi-Al-структуры.

0.4 = 0.2 эВ. Принимая переход между металлом и nSi резким можно определить соответствующие толщины слоев объемного заряда (W^{m1-n} и W^{n-m2}) на основе формулы

$$W^{m-n} = \left[\frac{2\epsilon\epsilon_0}{qN_D} (U_k \pm U_{\text{прил}}) \right]^{1/2} \quad (1)$$

При нулевом смещении получим исходные толщины слоев объемного заряда создаваемых выпрямляющими барьерами. Так

$$= 0,012138 \text{ см и } W_0^{n-m_2} = 0,00858 \text{ см,}$$

которые использованы при построении качественной зонной диаграммы Au-nSi-Al-структуры, рис. 1в. Как следует из эквивалентной схемы от приложенного общего

внешнего напряжения $U_{\text{общ}}^{(+)\text{Au-nSi-Al}(-)}$ к структуре, будем иметь общий ток

$$I_{\text{общ}}^{(+)\text{Au-nSi-Al}(-)} = I_{\text{прям}}^{\text{Au-nSi}} = I_{\text{обр}}^{\text{nSi-Al}}.$$

Однако общее напряжение состоит из суммы напряжений падающих на каждом переходе $U_{\text{общ}}^{(+)\text{Au-nSi-Al}(-)} = U_{\text{прям}}^{\text{Au-nSi}} + U_{\text{обр}}^{\text{nSi-Al}}.$

Вольтамперные характеристики в режиме прямого и обратного смещения Au-nSi-перехода в обычном (а) и двойном логарифмическом (б) масштабах приведены на рис. 2. В соответствии с эквивалентной схемой (рис. 1б) база при смене полярности рабочего напряжения поочередно запирается то с одной, то с другой стороны и задает ток, протекающий через структуру. При этом различие величин токов подтверждает, что переходы металл-полупроводник отличаются друг от друга. В нашем случае за счет применения различных металлов Au и Al.

Зависимости тока от напряжения описываются степенной функцией $I \sim U^\gamma$ и разбива-

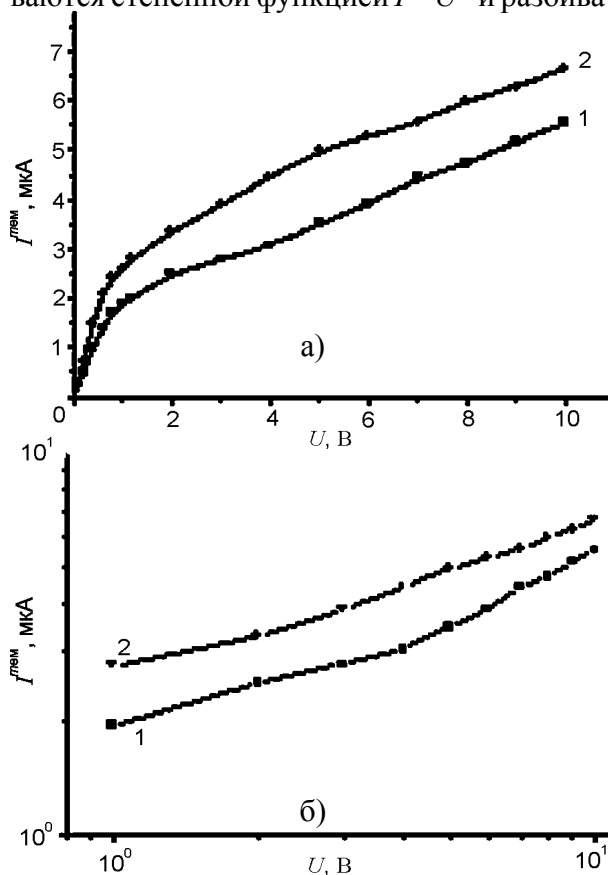


Рис. 2. Вольтамперные характеристики Au-nSi-Al-структуры в обычном масштабе (а) и в логарифмическом масштабе (б) при различных режимах включения: 1 – (-)Au-nSi-Al(+), 2 – (+)Au-nSi-Al(-).

ются на два участка. В режиме прямого смещения на первом участке показатель степени γ равен 0.3, который сменяется с показателем порядка 0.48, а в режиме запираания на первом участке показатель степени γ также равен 0.3, который сменяется с показателем равным 0.6. Полученные значения показателей степени близкие к 0.5 свойственны генерационному механизму токопереноса.

Используя методику определения падающих напряжений в каждом переходе [11] на основе экспериментальных данных вольтамперной характеристики определены значения U_1^{Au-nSi} и U_2^{Au-nSi} , которые приведены в табл. 1. В табл. 1 также приведены значения напряженности максимального электрического поля в запираемых переходах и величин емкостей, которые вычислены по формуле $C = \epsilon \epsilon_0 W_u$, где $S = 0.42 \text{ см}^2$ – площадь перехода. Здесь следует отметить, что ход зависимости токов в пересчете от падающего напряжения в точности повторяет ход кривой от общего запираемого напряжения (рис. 3),

то есть механизмы токопереноса являются идентичными.

Как видно из рис. 3, кривые 1 в прямосмещенных переходах ток увеличивается линейно относительно падающих напряжений, где показатели степени равны 1 и характеризуют механизм токопереноса обусловленный термоэлектронной эмиссией. Так как в прямосмещаемом переходе максимальное напряжение не может быть больше величины контактной разности потенциалов, то большая часть напряжения падает в последовательно соединенной к прямосмещаемому переходу квазинейтральной части базы $r_{\text{базы}}$, т.е.

$$U_{\text{прям}}^{Au-nSi} = U_{\text{прям}}^{Au-nSi*} + U_{r_{\text{базы}}}$$

Для заданного напряжения толщины слоев объемного заряда больше со стороны Au-nSi перехода или заданного тока также выше напряженности электрического поля, табл. 1. Относительно зависимости емкости от напряжения следует отметить, что исходная емкость Au-nSi-перехода имеет меньшее значение за счет большего значения контактной

Таблица 1

Расчетные данные напряжений падающих на переходах, емкостей и напряженностей электрического поля

(-)Au-nSi-Al(-)						
$U_{\text{общ}}^{(+)/Au-nSi-Al(-)}$, В	, мкА	U_1^{Au-nSi} , В	U_2^{nSi-Al} , В	$W^{nSi-Al(-)}$, см	$E^{nSi-Al(-)}$, В/см	$C^{nSi-Al(-)}$, Ф
0	0	0	0	0,008583	0	$5,19054 \cdot 10^{-11}$
0,2	0,7	0,1162	0,0838	0,009596	5,210503	$4,64256 \cdot 10^{-11}$
0,6	2,1	0,3486	0,2514	0,011831	15,21459	$3,76561 \cdot 10^{-11}$
1	2,6	0,4316	0,5684	0,015233	28,22785	$2,92454 \cdot 10^{-11}$
2	3,34	0,55444	1,44556	0,02311	54,08859	$1,92772 \cdot 10^{-11}$
4	4,45	0,7387	3,2613	0,034775	88,66102	$1,28109 \cdot 10^{-11}$
6	5,278	0,87615	5,12385	0,043056	112,2491	$1,0347 \cdot 10^{-11}$
8	6	0,996	7,004	0,049988	131,7124	$8,91219 \cdot 10^{-12}$
10	6,667	1,10672	8,89328	0,056059	148,629	$7,94698 \cdot 10^{-12}$
(-)Au-nSi-Al(+)						
$U_{\text{общ}}^{(-)/Au-nSi-Al(+)}$, В	, мкА	U_1^{Au-nSi} , В	U_2^{nSi-Al} , В	$W^{nSi-Al(-)}$, см	$E^{nSi-Al(-)}$, В/см	$C^{nSi-Al(-)}$, Ф
0	0	0	0	0,012138	0	$3,67026 \cdot 10^{-11}$
0,2	0,5	0,15	0,05	0,013349	6,277559	$3,33729 \cdot 10^{-11}$
0,6	1,4	0,42	0,18	0,01549	16,2301	$2,8761 \cdot 10^{-11}$
1	1,9	0,57	0,43	0,018886	30,09583	$2,35885 \cdot 10^{-11}$
2	2,5	0,75	1,25	0,026073	55,44364	$1,70869 \cdot 10^{-11}$
4	3,056	0,9168	3,0832	0,036723	88,80814	$1,21314 \cdot 10^{-11}$
6	3,89	1,167	4,833	0,045107	113,594	$9,87658 \cdot 10^{-12}$
8	4,72	1,416	6,584	0,052222	134,1197	$8,53089 \cdot 10^{-12}$
10	5,56	1,668	8,332	0,058507	152,0047	$7,61453 \cdot 10^{-12}$

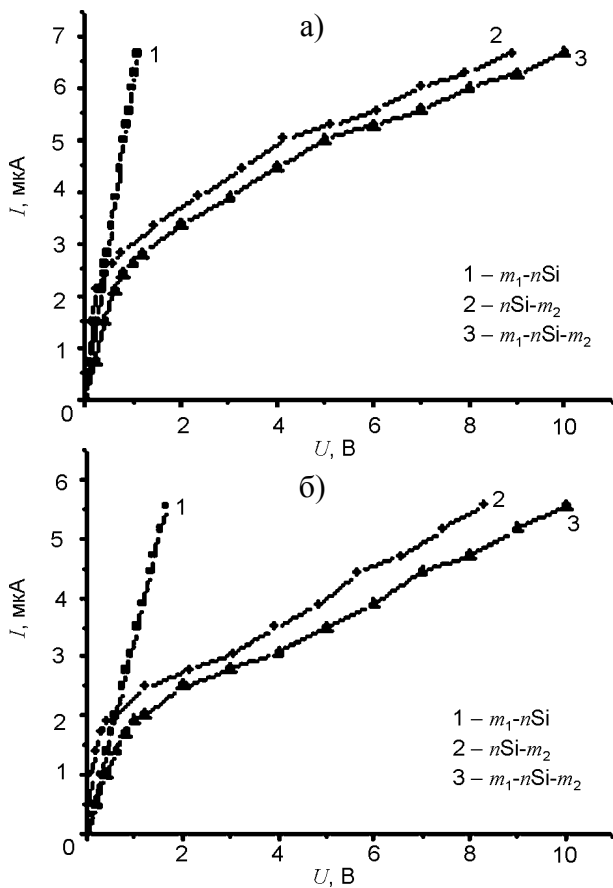


Рис. 3. Вольтамперные характеристики Au-nSi-Al-структуры при различных режимах включения от общего напряжения и в пересчете от напряжения падающего на каждом переходе: (а) (+)Au-nSi-Al(-); (б) (-)Au-nSi-Al(+).

разности потенциалов, но по мере увеличения рабочего напряжения значения емкостей сближаются.

Зависимость спектральной чувствительности от длины волны монохроматического излучения имеет максимум при 1.1 мкм, что соответствует собственной области поглощения, рис. 4.

Величина спектрального фототока от напряжения имеет возрастающий характер, что

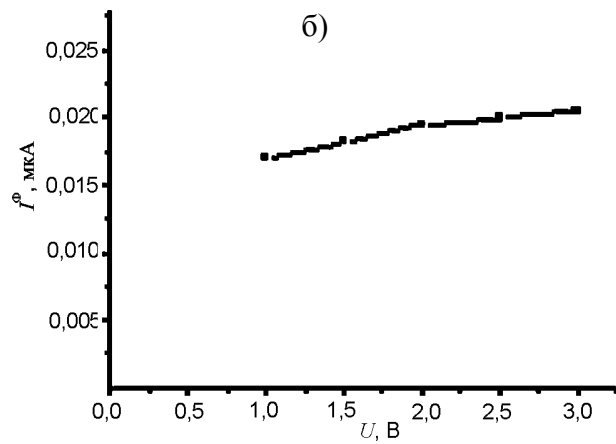
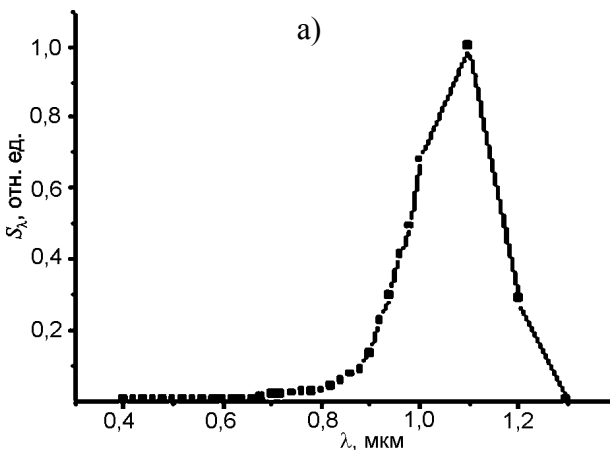


Рис. 4. Спектральная характеристика Au-nSi-Al-структуры (а) и зависимость фототока от рабочего напряжения в области собственного поглощения (б).

обусловлено с увеличением фотогенерированных носителей в области объемного заряда запираемого Au-nSi-перехода, рис. 4б (табл. 2). При этом нормированные значения фототока увеличиваются на 20%.

Таблица 2

Зависимость фототока от рабочего напряжения в области собственного поглощения фотопреобразовательной структуры

$U_{обр}, В$	Au-nSi-Al; $N_{Si} = 3.6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$	
	$I^p, \text{ мкА}$	S_λ
1,0	0,017	1
1,5	0,0182	1,07
2,0	0,0195	1,15
2,5	0,02	1,18
3,0	0,0205	1,206

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Так Au-nSi-Al-структуре с (концентрацией носителей $3.6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$) высокоомной базовой областью толщиной 600 мкм вольтамперные характеристики имеют симметричный вид, а механизмы токопередачи определяются генерационными процессами в области объемного заряда барьера металл-полупроводник [12]. Зависимость светового тока от интенсивности освещения носит линейный характер. Такие структуры могут использоваться в качестве фотодетекторов больших оптических сигналов. Подбирая параметры базовой области (толщину, концентрацию носителей), материал контакта можно получить многофункциональные фотоэлектропреоб-

разовательные структуры, перспективные для систем оптической связи и различных опто-электронных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Годованюк В.Н., Добровольский Ю.Г., Остапов С.Э., Раренко И.М., Фотий В.Д. Состояние и перспективы микрофотоэлектронного комплекса в Черновицком регионе Украины // Приклад. физика. – 2003. – № 3. – С. 72-83.
2. Трехбарьерный фотодиод Каримова: А.с. SU 1676399/А.В. Каримов. Оpubл. 09.11.89.
3. Karimov A.V., Yodgorova D.M., Yakubov E.N. Research of structures corrugated photoreceiving surface // Journal Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics. – 2004. – Vol. 7, № 4. – P. 378-382.
4. Каримов А.В., Ёдгорова Д.М. Инжекционно-полевой фотодиод // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – № 2. – С. 76-80.
5. Yodgorova D.M., Karimov A.V., Giyasova F.A., Karimova D.A. Research of the photo-voltaic effect in the two-base Ag-N⁰AlGaAs-n⁺GaAs-n⁰GaInAs-Au structure with various thickness of a base // Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics. – 2008. – Vol. 11, № 1. – P. 75-79.
6. Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А., Гиясова Ф.А., Назаров Ж.Т. Многофункциональная гомопереходная арсенидгаллиевая *n-p-m*-структура // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – № 6 (84). – С. 31-34.
7. Альферов Ж.И., Васильев М.Г., Горленок А.Т., Ильинская Н.Д., Лозовая Н.Г., Мамутин В.В., Маркова Т.А., Шелякин А.А. Лавинные фотодиоды на основе гетероструктур InGaAsP/InP с *p-n*-переходом в InP // Письма в ЖТФ. – 1982. – Т. 8, Вып. 12. – С. 722-724.
8. Андреев И.А., Серебренникова О.Ю., Соколовский Г.С., Куницына Е.В., Дюделев В.В., Гаджиев И.М., Дерягин А.Г., и др. Быстродействующие *p-i-n*-фотодиоды для спектрального диапазона 0.9 – 2.4 μm // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36, Вып. 9. – С. 43-49.
9. Слободчиков С.В., Салихов Х.М., Яковлев Ю.П., Саморуков Б.Е. О механизмах усиления фототока в изотипных гетероструктурах *n⁺-GaSb-n⁰-GaInAsSb-n⁺-GaAlAsSb* // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24, № 10. – С. 37-42.
10. Аверин С.В. Импульсный отклик МПМ фотодиода с гетеробарьером // ЖТФ. – 2004. – Т. 74, Вып. 6. – С. 53-56.
11. Каримов А.В., Ёдгорова Д.М. Определение характеристик двухбарьерных фотодиодных структур с металлополупроводниковыми переходами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – № 5. – С. 27-30.
12. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. Механизмы протекания тока в омических контактах металл-полупроводник // ФТП. – 2007. – Т. 41, Вып. 11. – С. 1281-1308.

LITERATURA

1. Godovanjuk V.N., Dobvol'skij Ju.G., Ostapov S.Je., Rarenko I.M., Fotij V.D. Sostojanie i perspektivy mikrofotoelektronogo kompleksa v Chernovickom regione Ukrainy // Prikklad. fizika. – 2003. – № 3. – S. 72-83.
2. Trehbar'ernyj fotodiod Karimova: A.s. SU 1676399/A.V. Karimov. Opubl. 09.11.89.
3. Karimov A.V., Yodgorova D.M., Yakubov E.N. Research of structures corrugated photoreceiving surface // Journal Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics. – 2004. – Vol. 7, № 4. – P. 378-382.
4. Karimov A.V., Jodgorova D.M. Inzhekcionno-polevoj fotodiod // Izv. vuzov. Radioelektronika. – 2006. – № 2. – S. 76-80.
5. Yodgorova D.M., Karimov A.V., Giyasova F.A., Karimova D.A. Research of the photo-voltaic effect in the two-base Ag-N⁰AlGaAs-n⁺GaAs-n⁰GaInAs-Au structure with various thickness of a base // Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics. – 2008. – Vol. 11, № 1. – P. 75-79.
6. Karimov A.V., Jodgorova D.M., Abdulhaev O.A., Gijasova F.A., Nazarov Zh.T. Mnogofunkcional'naja gomoperehodnaja arsenidgallievaja *n-p-m*-struktura // Tehnologija i konstruirovanie v jelektronnoj apparature. – 2009. – № 6 (84). – S. 31-34.
7. Al'ferov Zh.I., Vasil'ev M.G., Gorlenok A.T., P'inskaja N.D., Lozovaja N.G., Mamutin V.V., Markova T.A., Sheljakin A.A. Lavinnye fotodiody na osnove geterostruktur InGaAsP/InP c *p-n*-perehodom v InP // Pis'ma v ZhTF. – 1982. – Т. 8, Vyp. 12. – С. 722-724.
8. Andreev I.A., Serebrennikova O.Ju., Sokolovskij G.S., Kunicyna E.V., Djudelev V.V., Gadzhiev I.M., Derjagin A.G., i dr. Bystrodejstvujushhie *p-i-n*-fotodiody dlja spektral'nogo dia-

- pazona 0.9 – 2.4 μm // Pis'ma v ZhTF. – 2010. – T. 36, Vyp. 9. – S. 43-49.
9. Slobodchikov S.V., Salihov H.M., Jakovlev Ju.P., Samorukov B.E. O mehanizmah usilenija fototoka v izotipnyh geterostrukturah n+-GaSb-n0-GaInAsSb-n+-GaAlAsSb//Pis'ma v ZhTF. – 1998. – T. 24, № 10. – S. 37-42.
 10. Averin S.V. Impul'snyj otklik MPM fotodioda s geterobar'erom//ZhTF. – 2004. – T. 74, Vyp. 6. – S. 53-56.
 11. Karimov A.V., Jodgorova D.M. Opredelenie harakteristik dvuhbar'ernyh fotodiodnyh struktur s metallopoluprovodnikovymi perehodami// Tehnologija i konstruirovanie v jelektronnoj aparature. – 2005. – № 5. – S. 27-30.
 12. Blank T.V., Gol'dberg Ju.A. Mehanizmy protekanija toka v omicheskih kontaktah metall-poluprovodnik//FTP.– 2007. – T. 41, Vyp. 11. – S. 1281-1308.