

УДК 621.383.52;535.243

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА, к. ф.-м. н. Ф. А. ГИЯСОВА,  
к. ф.-м. н. М. А. МИРДЖАЛИЛОВА, Г. О. АСАНОВА, О. А. АБДУЛХАЕВ, Ж. Ф. МУХУТДИНОВ

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

E-mail: karimov@uzsci.net

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТОКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВОГО ФОТОДИОДА С ВЫПРЯМЛЯЮЩИМИ БАРЬЕРАМИ

*Приведены результаты исследований двухбарьерной фотодиодной кремниевой структуры с встречновключенными выпрямляющими переходами «металл – полупроводник» в фотодиодном и фотовольтаическом режимах включения. Такие структуры представляют интерес для создания устройств приема слабых оптических сигналов.*

*Ключевые слова: фотодиодные структуры, барьер Шоттки, выпрямляющий переход, двухсторонняя чувствительность.*

В настоящее время для передачи и приема информации все чаще применяют оптические системы. Их важными элементами являются приемные оптические модули, преобразующие оптические сигналы, принимаемые фотоприемником, в электрические, которые обрабатываются далее электронными устройствами. При этом от фотоприемника требуется высокая чувствительность даже к очень слабому оптическому сигналу, малая инерционность и низкий уровень шума [1, 2]. Этим требованиям в определенной степени отвечают фототранзисторы и фотодиоды без накопления зарядов. Однако постоянная времени фототранзистора больше, чем у фотодиода, что ограничивает его применение в системах связи [2]. Эту проблему можно решить путем создания структур с двумя барьерами Шоттки на основе кремния. Такой выбор материала обусловлен тем, что кремний является наиболее освоенным, технологически отработанным материалом. Однако остаются малоизученными фотодиодные структуры с двумя барьерами на его основе. Создание второго-третьего барьера в фотодиодной структуре способствует уменьшению ее емкости [3], усилению первичного фототока [4], увеличению частотного диапазона и быстродействия [5]. Настоящая работа посвящена исследованию процесса формирования токовых характеристик двухбарьерной фотодиодной кремниевой Au – nSi – Au-структуры с встречновключенными выпрямляющими переходами «металл – полупроводник» в фотодиодном и фотовольтаическом режимах включения.

### Образцы и методика исследований

Исследуемые фотодиоды получены на основе монокристаллического кремния *n*-типа проводимости с концентрацией носителей  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и удельным сопротивлением 2 Ом·см. Предвари-

тельная обработка пластин включала шлифовку и последующую полировку обеих поверхностей алмазной пастой АСМ-1.5. Перед нанесением металлических слоев кремниевые пластины обрабатывали в полирующем травителе HF:HNO<sub>3</sub>:CH<sub>3</sub>COOH (1:8:1), затем промывали в деионизованной воде и просушивали. Толщина базовой области составляла 300 мкм, а площадь – 0,54 см<sup>2</sup>.

Для получения выпрямляющих *p* – *n*-контактов к полированным поверхностям пластин кремния сначала в вакууме на одну поверхность напыляли Au, нагревали до 350°C, выдерживали в течение 30 с и затем в камеру запускали воздух. В результате получали Au – *n*Si-переход. Далее пластину кремния с нанесенным слоем переворачивали, напыляли Au на вторую поверхность для получения *n*Si – Au-перехода и проводили повторный отжиг при 350°C в течение 30 с, после чего медленно охлаждали.

Таким образом, первый слой Au отжигали дважды, и если между ним и *n*Si при повторном отжиге имела место диффузия и формировался инверсионный слой за счет образованных акцепторных центров [6], то со стороны свободной поверхности происходило закрепление (закалка) естественного оксидного нанослоя толщиной 40 Å [7], на который затем напыляли второй слой Au. Готовая Au – *n*Si·SiO<sub>2</sub> – Au-структура с тонким промежуточным слоем SiO<sub>2</sub> имела большой темновой ток в режиме запираания Au – *n*Si-перехода и, следовательно, несимметричную вольт-амперную характеристику (ВАХ). При этом она обладала двухсторонней чувствительностью, в частности при подсветке со стороны *n*Si·SiO<sub>2</sub> – Au-перехода наблюдался фотовольтаический эффект. Как показано на рис. 1, спектральный диапазон фотоотклика двухба-

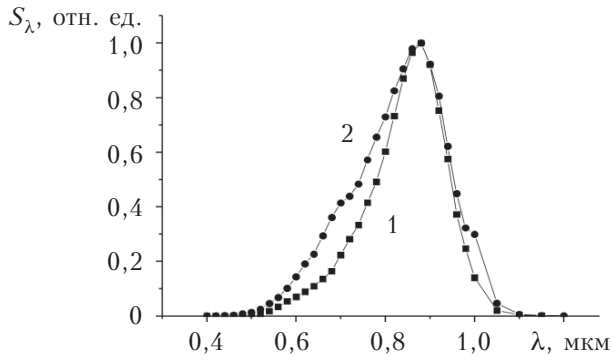


Рис. 1. Спектральная характеристика фотоотклика фотодиода с  $p-nSi$ -переходом (1) и  $Au-SiO_2 \cdot nSi-Au$ -структуры (2)

рьерной структуры (кривая 2) охватывает от 0,5 до 1,1 мкм и, в отличие от фотодиода с  $p-nSi$ -переходом (кривая 1), в видимой области спектра наблюдается увеличение полуширины ее спектральной чувствительности в направлении коротковолнового края спектра.

**Экспериментальные результаты**

Полученную двухстороннюю структуру освещали вольфрамовой лампой накаливания с максимумом излучения при  $\lambda = 860$  мкм. Как видно на рис. 2, а, фототок короткого замыкания  $I_{кз}$  с ростом интенсивности интегрального освещения вплоть до 300 лк резко возрастает и далее выходит на насыщение. Такое поведение тока короткого замыкания можно объяснить влиянием неосвещаемого барьера, выступающего в качестве последовательного сопротивления, ко-

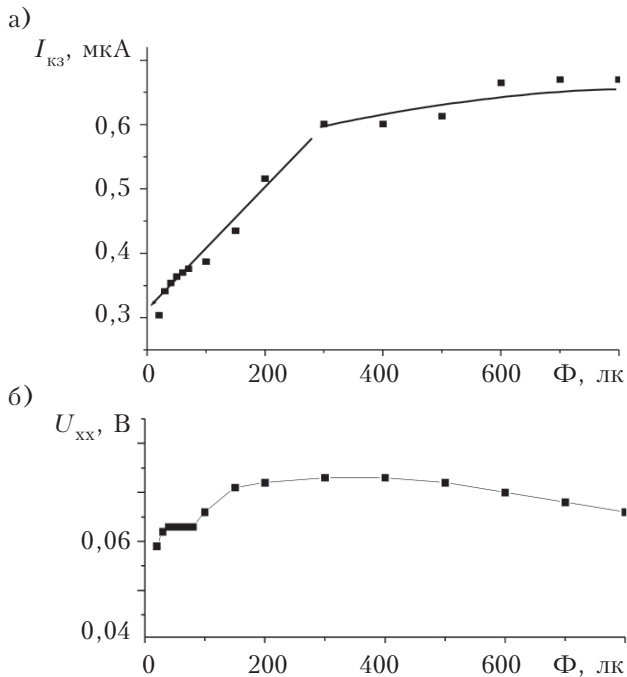


Рис. 2. Зависимость тока короткого замыкания (а) и напряжения холостого хода (б) от интенсивности интегрального освещения  $Au-SiO_2 \cdot nSi-Au$ -структуры

торое уменьшается с повышением интенсивности освещения [8].

Напряжение холостого хода  $U_{xx}$  структуры с ростом интенсивности освещения до 300 лк также увеличивается и далее плавно снижается, как показано на рис. 2, б.

При освещении структуры с любой стороны появляется фото-эдс положительной полярности на одном и том же выводе ( $nSi-SiO_2-Au$ ). При смене освещаемой поверхности меняются значения фототока. При подаче положительного напряжения на электрод, создающий ЭДС положительной полярности, т. е.  $(+)Au-SiO_2 \cdot nSi-Au(-)$ , как темновой, так и световой токи имеют большие значения, чем при обратной полярности напряжения (рис. 3, а). Здесь ветвь с большим током можно считать прямой. Так как переход  $Au-SiO_2 \cdot nSi$  включен в прямом направлении, напряжение, приложенное к структуре в направлении  $(+)Au-SiO_2 \cdot nSi-Au(-)$ , вызывает темновой ток запираемого перехода  $nSi-Au$  (кривая 1).

При смене полярности приложенного напряжения, т. е.  $(-)Au-SiO_2 \cdot nSi-Au(+)$ , переход  $Au-SiO_2 \cdot nSi$  становится запираемым. Следовательно, через оба перехода будут протекать обратные токи. При этом обратный ток  $nSi-Au$ -перехода больше тока  $Au-SiO_2 \cdot nSi$ -перехода, а токи насыщения отличаются на один порядок (см. рис. 3, б).

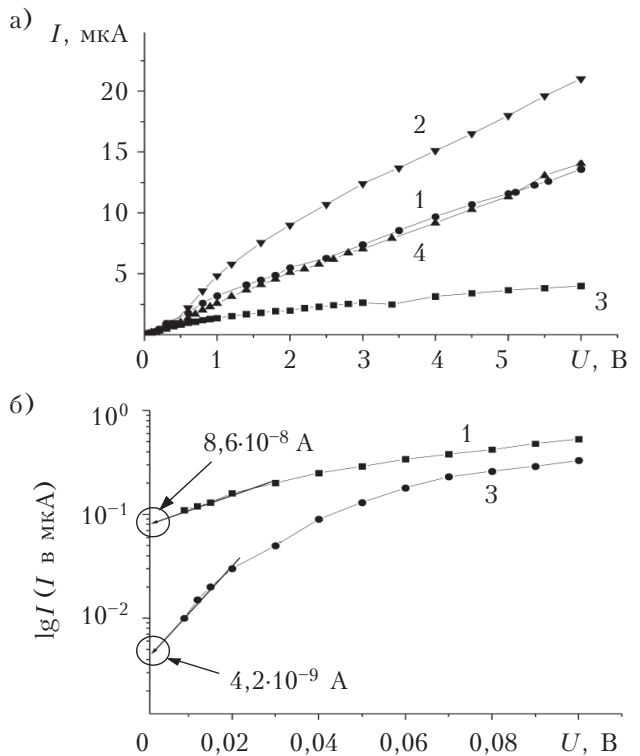


Рис. 3. Зависимость от рабочего напряжения темнового (1, 3) и светового тока при  $\Phi = 10$  лк (2, 4) (а) при прямом (1, 2) и обратном (3, 4) включении и начальные участки темновых ВАХ (б)

Наблюдаемое поведение токовых характеристик можно объяснить следующей моделью. От подсветки в Au — SiO<sub>2</sub>·nSi — Au-структуре создается фото-эдс, которая компенсируется прямо смещающим напряжением, и после полной компенсации световой ток начинает возрастать (кривая 2), как и темновой ток другого перехода (кривая 1). В другом направлении, в режиме запираения, световой ток (кривая 4) ограничивается запираемым фотогенерирующим переходом с меньшим темновым током (кривая 3).

Таким образом, в Au — SiO<sub>2</sub>·nSi — Au-структуре при освещении со стороны перехода с низким током насыщения создается фотовольтаическая эдс, которая больше, чем на переходе с большим током насыщения. При этом знак фото-эдс не меняется при смене освещаемой поверхности.

Обнаруженную независимость полярности фотовольтаического эффекта от того, какая поверхность освещается, можно объяснить тем, что большая фото-эдс создается со стороны поверхности с положительной полярностью, а малая с противоположной полярностью — на другом переходе. То есть, при освещении с другой стороны излучение достигает области перехода, где генерация фототока происходит с высокой эффективностью, а возникшая эдс компенсирует генерируемую в освещаемом переходе фото-эдс, значение которой невелико. По мере увеличения интенсивности освещения значения эдс, генерируемых на каждом переходе, сближаются, компенсируя друг друга.

Эквивалентная схема двухбарьерной структуры представляет собой два диода, один из которых создает фото-эдс, и при замыкании его выводов получается фототок короткого замыкания. В этом случае второй диод служит нагрузкой, и ток через него проходит беспрепятственно. При подаче от внешнего блока питания нарастающего напряжения, появляющаяся с начала фото-эдс компенсируется напряжением противоположной полярности, и ток в цепи будет увеличиваться с ростом напряжения за счет инжекции носителей через прямосмещаемый освещаемый переход. При смене полярности источника питания освещаемый переход запирается и входит в режим фотодиода, в результате появляется фотогенерационный ток, который суммируется с темновым током.

\*\*\*

Таким образом, установлено, что фотогенерация носителей осуществляется более интенсивно в переходе «металл — полупроводник» с меньшим током насыщения. В режиме прямого смещения фотогальванического перехода зависимость тока от напряжения в запираемом переходе имеет возрастающий характер, т. е. этот переход не ограничивает ток резко. В результате при освещении осуществляется инжекция но-

сителей через прямосмещаемый переход и перераспределение напряжения на запираемый переход. Однако при смене полярности ток через диод ограничивается, что снижает значения фототока. Изученные двухбарьерные структуры представляют интерес для создания устройств приема слабых оптических сигналов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Андреев В. А., Бурдин В. А., Попов Б. В., Польников А.И. Строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий связи. — Москва: Радио и связь, 1996. [Andreev V. A., Burdin V. A., Popov B. V., Pol'nikov A.I. Stroitel'stvo i tekhnicheskaya ekspluatatsiya volokonno-opticheskikh linii svyazi. Moscow: Radio i svyaz', 1996]

2. Варава Н., Никоноров М., Пронин С. Оптические усилители edfa: практическое применение // Первая мяля. — 2011. — № 3. — С. 48–52. [Varava N., Nikonorov M., Pronin S. // Pervaya milya. — 2011. № 3. S. 48]

3. Абдулхаев О. А., Асанова Г. О., Ёдгорова Д. М. и др. Исследование влияния потенциальных барьеров на механизмы токопереноса во встречновключенных двухбарьерных кремниевых структурах // Физическая инженерия поверхности. — 2011. — Т. 9, № 3. — С. 262–268. [Abdulkhaev O. A., Asanova G. O., Yodgorova D. M. i dr. // Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti. 2011. Vol. 9, N 3. P. 262]

4. Ёдгорова Д. М. Эффект усиления фототока в фотодиодной структуре с прямо- и обратновключенными переходами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2010. — № 1. — С. 3–5. [Yodgorova D. M. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2010. N 1. P. 3]

5. Аверин С. В., Сашо Р. Быстродействующие МПМ-фотодиоды // Матер. 13-й Междунар. конф. «КрыМиКо-2003». — Украина, Крым, г. Севастополь. — 2003. — С. 189–190. [Averin S. V., Sasho R. // Mater. 13-i Mezhdunar. konf. «KryMiKo-2003». Ukraine, Crimea, Sevastopol. 2003. P. 189]

6. Беляев А. Е., Болтовец Н. С., Капитанчук Л. М. и др. Омические контакты Au — Ti — n<sup>+</sup>Si, Au — Ti — Pd<sub>2</sub>Si — n<sup>+</sup>Si к кремниевым СВЧ диодам // Техника и приборы СВЧ. — 2009. — № 2. — С. 31–34. [Belyaev A. E., Boltovets N. S., Kapitanchuk L. M. i dr. // Tekhnika i Pribory SVCh. Odessa, N 2. P. 31]

7. Филатова Е.О., Соколов А.А., Тарачева Е.Ю., Баргов И.В. Исследование естественного окисла на поверхности монокристаллического кремния (111) и (100) марки КЭФ (111) и марки КДБ методом спектроскопии отражения // Письма в ЖТФ. — 2009. — Т. 35, вып 2. — С. 36–41. [Filatova E.O., Sokolov A.A., Taracheva E.Yu., Bagrov I.V. // Pis'ma v ZhTF. 2009. Vol. 35, iss 2. P. 36]

8. Светличный А. М., Агеев О. А., Шляховой Д. А. Особенности получения тонких пленок SiO<sub>2</sub>, методом быстрой термической обработки // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2001. — № 4–5. — С. 38–43. [Svetlichnyi A. M., Ageev O. A., Shlyakhovoi D. A. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2001. N 4–5. P. 38]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 28.08 2012 г.

Karimov A. V., Yodgorova D. M., Giyasova F. A., Mirdzhalilova M. A., Asanova G. O., Abdulkhaev O. A., Mukhutdinov Zh. F. **Study on the formation of current characteristics of a silicon photodiode with rectifying barriers.**

*Keywords: photodiode structures, Schottky barriers, rectifying junction, two-way sensitivity.*

The article presents the results of studies on silicon photodiode double-barrier structure with back-to-back rectifying junctions «metal – semiconductor» in the photodiode and photovoltaic modes. Such structures are of interest for the development of input devices for weak optical signals.

Uzbekistan, Tashkent, Physical-Technical Institute of SPA «Physics-Sun» of NAS of Uzbekistan.

Карімов А. В., Йодгорова Д. М., Гиясова Ф. А., Мірджалілова М. А., Асанова Г. О., Абдулхаєв О. А., Мухутдінов Ж. Ф. **Дослідження процесу формування струмових характеристик кремнієвого фотодіода з випрямляючими бар'єрами.**

*Ключові слова: фотодіодні структури, бар'єр Шоткі, випрямляючий перехід, двостороння чутливість.*

Наведено результати досліджень двобар'єрної фотодіодної кремнієвої структури з зустрічновіткненими випрямляючими переходами «метал – напівпровідник» у фотодіодному та фотовольтаїчному режимах включення. Такі структури становлять інтерес для створення пристроїв прийому слабких оптичних сигналів.

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

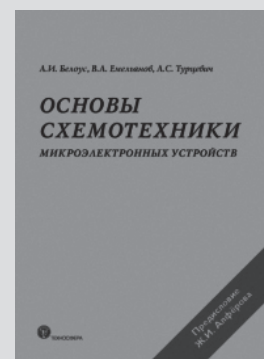
НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



**Белоус А. И., Емельянов В. А., Турцевич А. С. Основы схемотехники микроэлектронных устройств.**— Москва: Техносфера, 2012.— 472 с.

В книге представлен анализ особенностей работы, методы проектирования и основы практического применения цифровых микросхем в составе современных микроэлектронных устройств, предложен большой набор эффективных схемотехнических решений базовых элементов для реализации требований, предъявляемых к микроэлектронным устройствам, приведено детальное описание принципов работы и правил применения современных базовых элементов в составе микроэлектронных устройств. Издание ориентировано на широкий круг инженерно-технических работников, ученых, студентов и аспирантов, специализирующихся в области разработки, организации производства и эксплуатации радиоэлектронной бытовой, промышленной и специальной техники, в информационно-коммуникационных, телекоммуникационных и навигационных сферах, где используются современные микроэлектронные устройства.



НОВЫЕ КНИГИ



**Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия / Под ред. А. Г. Васильева.**— Москва: Техносфера, 2011.— 592 с.

Представленный в книге аналитический обзор охватывает свыше 1750 работ, посвященных III-N полупроводникам, которые применяются для создания транзисторов и радиоэлектронных устройств большой мощности, работающих в СВЧ-диапазоне частот. Рассмотрены материалы, приборы, их технология, моделирование, проблемы надежности и применения. Книга предназначена для студентов, аспирантов, инженеров, разработчиков приборов и соответствующей аппаратуры.

