

К. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА, Э. Н. ЯКУБОВ

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

Дата поступления в редакцию  
05.05 2005 г.

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

## ДЕТЕКТОРЫ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА НА ОСНОВЕ СТРУКТУР Au-nSi-Al, Au-nSi

*Получены перспективные для детектирования оптических сигналов двухбарьерные структуры и поверхностно-барьерные структуры с модифицированными охранными высокоомными слоями с перекрытием металла.*

Кремниевые поверхностно-барьерные структуры, изготовленные путем напыления сплошных поверхностно-барьерных контактных областей (Au), широко используются в качестве детекторов ионизирующего излучения. При этом они работают в запирающем режиме при обратных смещениях, обеспечивающих обеднение области поверхностного барьера вплоть до 20—30 мкм.

В известных детекторных структурах зачастую появляются дополнительные токи утечки, ухудшающие пороговые характеристики структуры. Одним из способов уменьшения токов утечки является создание охранного кольца, которое представляет собой диффузионную область с типом проводимости, противоположным типу проводимости активной области. К недостаткам таких структур относится большое время восстановления и большая паразитная емкость за счет диффузионного  $p-n$ -перехода [1, с. 310—315].

В принципе детекторы ядерного излучения не отличаются от фотоприемников, т. е. при попадании ионизирующего излучения в область объемного заряда образуются неравновесные носители. Обеспечение эффективности разделения генерированных носителей и оптического сигнала путем модифицирования детекторной структуры позволит детектировать оптические сигналы. Это и является целью настоящей работы.

Для решения задачи нами были изготовлены двухбарьерные и поверхностно-барьерные структуры со своеобразными модифицированными охранными высокоомными слоями с перекрытием металла. Своеобразие заключается в том, что так называемое охранное кольцо представляет собой диэлектрический

слой оксида кремния в виде окружности, обрамляющей верхний потенциальный барьер с высокоомным тонким промежуточным слоем (рис. 1).

Двухбарьерная Au-nSi-Al-структура получена путем напыления полупрозрачного слоя из Au толщиной порядка 50 Å и тыльного полупрозрачного слоя из Al (50 Å). Данная структура является частным случаем трехбарьерной фотодиодной структуры [2] и обладает преимуществами по сравнению с обычными в части фоточувствительности и коммуникационности при стыковке с электронными схемами.

Поверхностно-барьерные Au-nSi-структуры с модифицированными охранными высокоомными слоями с перекрытием металла также имеют некоторые преимущества по темновым токам и фоточувствительности. Модернизация структур на основе Al-n<sup>+</sup>-Si-Al с барьером Шоттки в работе [3] осуществлена диффузией из твердотельного источника в сформированных на свободной поверхности кремния окнах SiO<sub>2</sub> при импульсном лазерном облучении.

Нами Au-nSi-структуры изготовлены путем отжига напыленного в окошко из оксида кремния Au при 700°C в потоке водорода, а также с последующим повторным напылением Au для создания барьера. Тыльный омический контакт получен вжиганием Al при 680°C в потоке водорода.

### Двухбарьерные Au-nSi-Al-структуры

Двухбарьерные Au-nSi-Al-структуры изготовлены на основе пластин кремния  $n$ -типа проводимости с концентрацией носителей  $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  толщиной 400 мкм и площадью 1,8 см<sup>2</sup>. Со стороны фотоприемной поверхности из Au потенциальный барьер равен  $\phi=0,8 \text{ эВ}$ , а с тыльной стороны, где Al, —  $\phi=0,6 \text{ эВ}$  [4, с. 188—194]. Эквивалентная схема Au-nSi-Al-структуры состоит из двух встречновключенных барьеров.

В любом из направлений от приложенного напряжения реализуется фотодиодный режим. Вольт-амперная характеристика является симметричной по отношению к центральной оси. При освещении Au-nSi-Al-структуры видимым светом с максимумом излучения 0,55 мкм в обоих направлениях появляется фототок, ход кривой которого повторяет обратную кривую, причем чем больше интенсивность освещения, тем больше фототок (рис. 2). При этом фоточувствительность достигает 0,7 А/Вт. Прямая и обратная ветви представляют собой характеристики двух встречновключенных Шоттки-переходов, один из которых всегда включен в запираемом направлении.

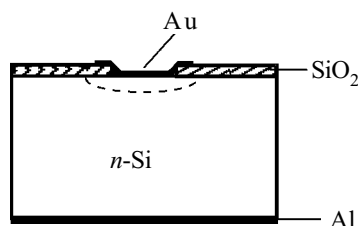


Рис. 1. Геометрия поверхностно-барьерной модифицированной структуры

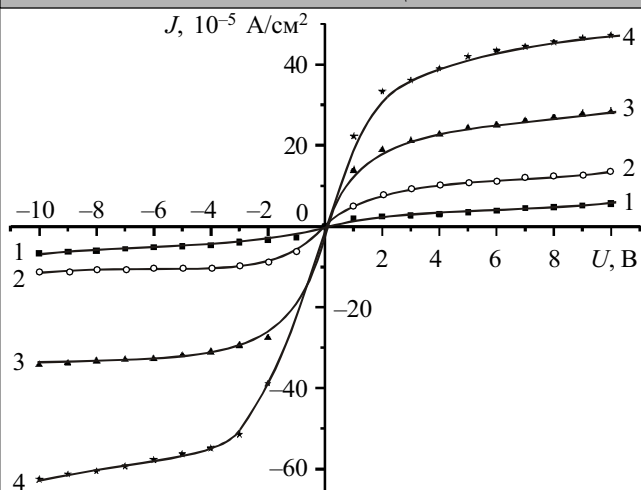


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика двухбарьерной Au-nSi-Al-структуры при различной освещенности: 1 — темновая; 2 —  $10^3$  лк; 3 —  $3 \cdot 10^3$  лк; 4 —  $6 \cdot 10^3$  лк

По мере увеличения приложенного обратного напряжения по отношению к барьеру Au-nSi вместе с его высотой возрастает и поле, а в противоположном конце, наоборот, переход nSi-Al входит в режим прямого смещения. Эффект изменения высоты барьера проявляется также с увеличением интенсивности освещения за счет увеличения концентрации генерированных светом носителей. Таким образом, получается семейство характеристик при различной освещенности (кривые 2—4).

Как показали исследования спектральных характеристик двухбарьерных Au-nSi-Al-структур в фотодиодном режиме (рис. 3), максимальная фоточувствительность при комнатной температуре в них достигается в коротковолновой области спектра (0,5 мкм), затем, уменьшаясь по закону, близкому к квадратичному, простирается до 1,2 мкм. Здесь отметим, что величина чувствительности в данной области спектра будет увеличиваться с повышением напряжения, приложенного в обратном направлении к освещаемому переходу.

Фоточувствительность в коротковолновой области почти на порядок больше, чем в видимой области спектра, т. е. данная двухбарьерная структура может

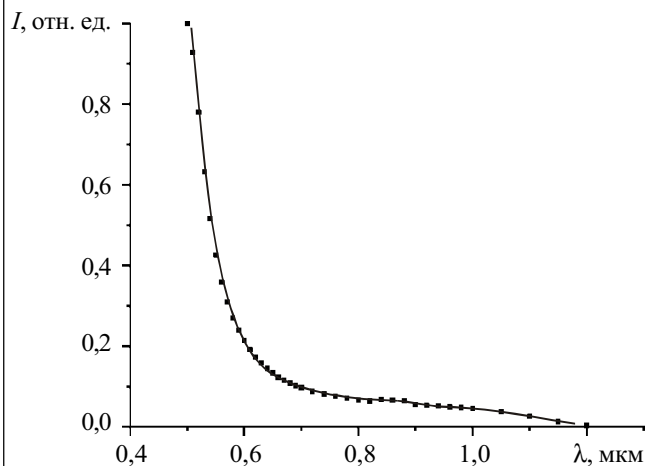


Рис. 3. Спектральная характеристика поверхностно-барьерной Au-nSi-Al-структуры

выполнять роль коротковолнового фотодетектора. Высокая фоточувствительность в коротковолновой области спектра свидетельствует об отсутствии дефектов на границе перехода "металл—полупроводник".

### Au-nSi-структуры с модернизированными охранными высокоомными слоями с перекрытием металла

Модernизированные образцы изготовлены на основе монокристаллического кремния n-типа проводимости с удельным сопротивлением 1 кОм. Диаметр исходного кристалла составляет 24 мм при толщине 300 мкм. Омические и выпрямляющие контакты нанесены на обе поверхности в виде малых окружностей. Диаметр контакта, расположенного в центре кристалла, составляет 6—8 мм, и структура представляет собой диод с перекрытием металла, в котором оксидный слой окружает контактную область.

Исследования вольт-емкостных характеристик (рис. 4) показали, что на начальном участке имеется маленькое плато, которое в дальнейшем продолжается в обычном виде  $C^2 \sim U$ , т. е. по квадратичному закону.

Наличие плато вызывается постоянством зависимости емкости от напряжения за счет наличия поверхностного тонкого высокоомного слоя. В области напряжений от 0 до 2 В толщина слоя объемного заряда  $W$  (см. рис. 5) имеет постоянное значение (14,8 мкм),

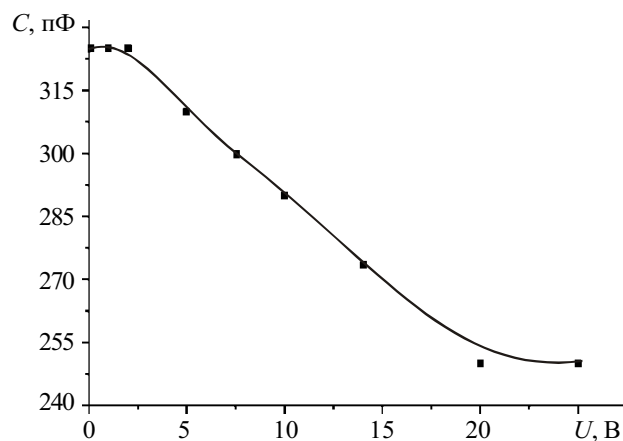


Рис. 4. Вольт-емкостная характеристика Au-nSi-структуры в запирающем режиме

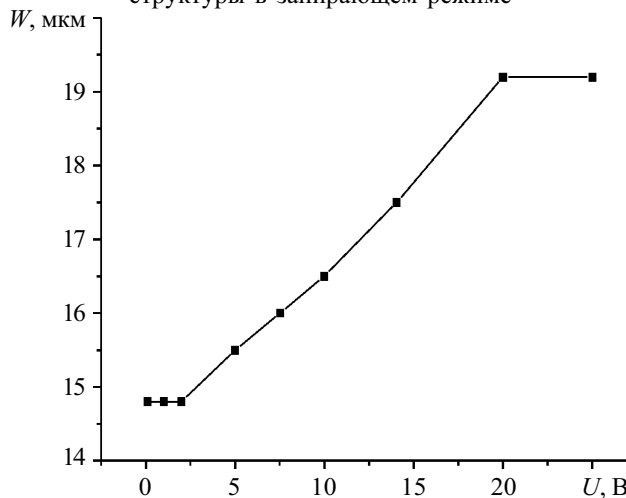


Рис. 5. Зависимость толщины слоя объемного заряда Au-nSi-структуры от запирающего напряжения

далее, по мере увеличения приложенного напряжения до 20 В, она увеличивается линейно и при достижении 20 В вновь становится постоянной (19,2 мкм).

Неизменность толщины слоя обеднения на начальном участке можно объяснить пониженной концентрацией носителей  $N$  на границе с металлом. В частности, как показано в **таблице**, концентрация носителей в диапазоне до 2 В увеличивается в 3,5 раза, далее имеет место более равномерный рост, а при напряжении 20 В опять наблюдается значительное увеличение концентрации носителей.

$U, \text{В}$	0	1	2	5	7,54	10	14	20	25
$N, 10^{12} \text{ см}^{-3}$	4,19	9,3	14,6	27,3	33,4	44,5	54,2	63,7	79

Таким образом, по расчетным данным, концентрация носителей в активной области последовательно возрастает. Потенциальный барьер, равный 0,8 эВ (по данным [4] и определенный из зависимости корня квадратного из фототока от энергии) — единственный и создан на основе Au. Все напряжение, приложенное извне, падает на потенциальном барьере фотоприемной поверхности. Исследуемая структура представляет собой полупроводник с одним выпрямляющим потенциальным барьером с тонким высокоомным поверхностным слоем.

При приложении прямого напряжения (плюс к Au) контактная разность потенциалов уменьшается и переход "металл—полупроводник" смещается в прямом направлении, в результате (**рис. 6**) имеем первый квадрант вольт-амперной характеристики. При приложении обратного напряжения (минус к Au) к исходной контактной разности потенциалов добавляется приложенное извне напряжение, и переход "металл—полупроводник" будет смещаться в обратном направлении. При этом возрастает поле в потенциальном барьере, а толщина слоя объемного заряда увеличивается (см. **рис. 5**).

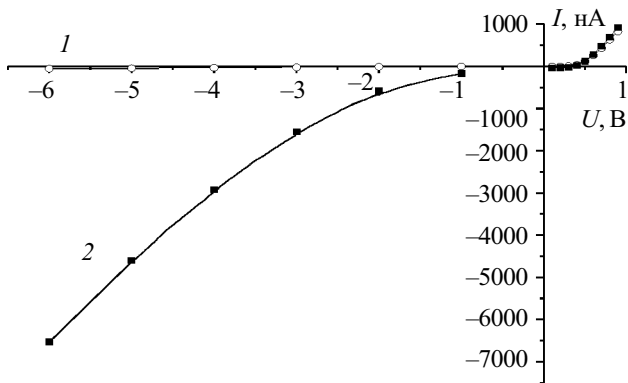


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика Au-nSi-структуры: 1 — темновая; 2 — при освещении 1000 лк

Вольт-амперная характеристика исследуемой Au-nSi-структуры с охранным кольцом (**рис. 6**) описывается зависимостью ( $q$  — заряд электрона,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура,  $n$  — безразмерный коэффициент показателя экспоненты)

$$I = \exp \frac{qU}{nkT},$$

состоящей из двух участков. На первом участке  $n_1=4,98$ , на втором участке  $n_2=8,0$ . Данные показате-

ли свидетельствуют о высоких значениях протекающего тока.

Как показано в работе [5], наличие высокоомного промежуточного слоя позволяет управлять высотой потенциального барьера и токопереносом. При наличии высокоомного промежуточного слоя в кремниевых диодных структурах с барьером Шоттки из Pd показатель степени оказался равным 3. В нашем случае этот показатель равен 4,98 и 8,0, что может быть связано не только с промежуточным слоем, но и с влиянием примесных уровней золота, расположенных посередине запрещенной зоны кремния.

Обратная ветвь ВАХ описывается степенной зависимостью  $I \approx U^\gamma$  с показателем степени при комнатной температуре  $\gamma_1=0,59$  и  $\gamma_2=0,88$ .

Данная структура при освещении видимым светом (**рис. 6**,  $\lambda \approx 0,55$  мкм) ведет себя как фотодиод. При подсветке изменение тока в прямой ветви незначительно, а в обратной ветви фототок увеличивается нелинейно с ростом приложенного напряжения. Наблюдаемый вид зависимости свидетельствует о наличии внутреннего фотоэлектрического усиления [7, с. 192—195].

В темноте обратный ток с ростом напряжения практически не возрастает, однако при внешних воздействиях (освещении) с ростом напряжения начинает резко возрастать. Ход наблюдаемой кривой можно объяснить полным падением приложенного напряжения в потенциальном барьере, при этом темп роста поля опережает темп увеличения толщины слоя объемного заряда. В результате имеем увеличение фототока с увеличением напряжения. Чем больше напряжение, тем больше носителей заряда генерируется.

Спектральный оптический диапазон данной структуры (**рис. 7**) является широким. Начинаясь в области 0,4 мкм, fotocувствительность достигает максимума при 0,5 мкм и далее сохраняется на уровне 60% до 1,0 мкм с понижением до минимума при 1,2 мкм. Наблюдаемую зависимость можно объяснить наличием расположенного близко к поверхности более высокоомного тонкого слоя.

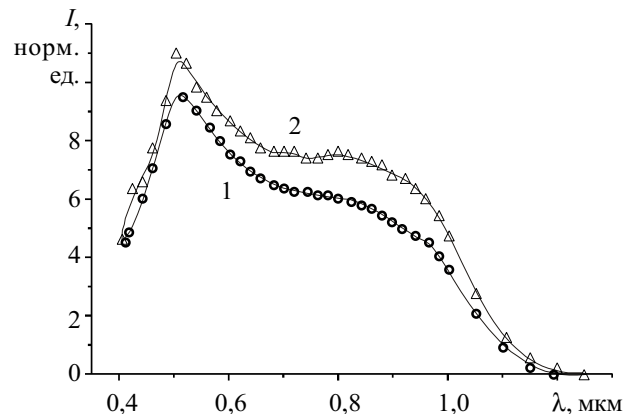


Рис. 7. Спектральная fotocувствительность Au-nSi-структуры: 1 —  $U=1,0$  В; 2 —  $U=5,0$  В

Расширение спектрального диапазона в длинноволновой области спектра связано с глубоким примесным уровнем, расположенным посередине запрещенной зоны в приповерхностной области крем-

ния. Эти уровни при приложении обратного напряжения являются ионизированными. Так, по мере увеличения рабочего напряжения от 1 до 5 В фототок увеличивается. Характерным является то, что фототок в диапазоне  $\lambda=0,92...1,2$  мкм увеличивается синхронно с напряжением.

Таким образом, как световые токи, так и спектральные характеристики модифицированной Au-nSi-структуры с охранными высокоомными слоями с перекрытием металла управляются приложенным напряжением. Создание в приповерхностной области активного слоя из более высокоомного слоя, наряду с расширением спектрального диапазона, повышает фоточувствительность.

**Заключение**

Получены Au-nSi-Al-структуры с встречновключенными выпрямляющими переходами и Au-nSi-структуры с охранными высокоомными слоями с перекрытием металла. Высокая фоточувствительность в коротковолновой области спектра (0,5—0,6 мкм) обеспечивается высоким полем под барьером благодаря отсутствию дефектов на границе перехода "металл—полупроводник".

В Au-nSi-структуре с охранным высокоомным слоем с перекрытием металла образование тянущего поля для генерированных светом носителей заряда за счет диффузионного распределения носителей позволяет получить высокую фоточувствительность в диапазоне спектра от 0,92 до 1,2 мкм.

Полученные структуры представляют интерес для детектирования оптических сигналов.

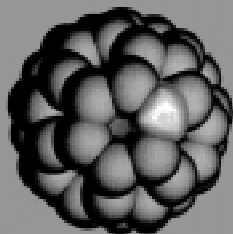
**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1.— М. Мир, 1984.
2. Каримов А. В. Фотоэлектрическое усиление в трехбарьерной структуре // Лазерная техника и оптоэлектроника.— 1993.— № 3.— С. 83—85.
3. Воробец Г. И., Воробец М. М., Стребжев В. Н. и др. Исследование физических механизмов лазерной коррекции и стабилизации параметров структур Al-n<sup>+</sup>-Si-Al с барьером Шоттки // ФТП.— 2004.— Т. 38, вып. 6.— С. 690—692.
4. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл—полупроводник.— М.: Мир, 1975.
5. Слободчиков С. В., Салихов Х. М., Руссу Е. В., Малинин Ю. Г. Гашение тока светом в диодных структурах p-Si-n<sup>+</sup>-ZnO-n-ZnO-Pd // ФТП.— 2001.— Т. 35, вып. 4.— С. 479—481.
6. Аут И., Генцов Д., Герман К. Фотоэлектрические явления.— М.: Мир, 1980.

**ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ**

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА НАНО-ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВ**

1-3 ноября 2005 года



**NTMEX - 2005**

Москва. Новый Арбат, 36  
здание Правительства Москвы

ООО "Компания МММ ПРОФ"  
107140, г. Москва, ул. В. Красносельская, д.2/1, стр.1  
Тел./факс: (095) 502-19-38, 775-17-20, 502-19-37  
E-mail: mikropof@mail.ru www.mikmexpro.ru

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ**

- |  |  |
|--|--|
| ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ<br>ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА НАНОМАТЕРИАЛОВ | НАДРОСЫ И ОРГАНИКАЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ<br>НА ОСНОВЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ |
| НАНОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ<br>КОМПОНЕНТОВ И МИКРОСИСТЕМ               | НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ                                 |
| УСЛУГИ В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ                              | ПРИМЕНЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ<br>ГОРОДСКОГО КОЗЯЙСТВА    |

**ОРГАНИЗАТОРЫ**

Департамент науки и промышленной политики города Москвы  
Московский комитет по науке и технологиям

Московский комитет по науке и технологиям  
121069, г. Москва, Борокостебловский пер., д.б, стр.3  
Тел.: (095) 202-76-91, 201-23-86.  
Факс: (095) 201-30-95 e-mail: pas@mika.ru

**НОВЫЕ КНИГИ**



**Каганов В. И. Радиотехнические цепи и сигналы.— М.: Высшая школа, 2004.— 25 л.**

Изложен материал по всем разделам вузовской программы одноименного курса. Рассмотрены основы теории по передаче и приему сообщений с помощью радиосигналов, по спектральной теории сигналов и их генерированию, усилению, преобразованию, модуляции, детектированию, демодуляции и обработке. Изложена теория радиоэлектронных линейных, нелинейных и параметрических цепей аналогового и цифрового типов. Приведены 77 программ на основе универсального математического пакета программ «Mathcad» по всем разделам дисциплины, позволяющих с помощью компьютера анализировать и рассчитывать радиотехнические цепи и сигналы.

**НОВЫЕ КНИГИ**