

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

СТРУКТУРЫ  $a\text{-Si} : \text{H}/\text{Si}$   
С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ОБЛАСТЬЮ  
СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Комиренко Р. П., Литвиненко С. В., Скрышевский В. А.,  
Стриха В. И., Кочка Я., Стухлик И.

При создании каскадных структур, используемых для преобразования световой энергии в электрическую, требуется согласование ширины запрещенной зоны для верхнего и нижнего элементов [1-4]. Структура типа  $a\text{-Si} : \text{H}/\text{Si}$  на кремниевой подложке не оптимизирована по этому требованию, однако, поскольку в ней имеются встречно включенные барьеры в слоях с разной энергией фотовозбуждения, можно ожидать получения спектральных характеристик фототока, зависящих от приложенного смещения, а это позволяет создавать приборы с другими функциональными возможностями.

## Технология изготовления

Каскадный фотоэлемент  $\text{Pt}-(i) a\text{-Si} : \text{H}-(n^+) a\text{-Si} : \text{H}-\text{Ti}-\text{SiO}_2-p\text{-Si}-\text{Ni}$  создавался следующим образом. После стандартной химической обработки пластины  $p\text{-Si}$  ( $\rho=10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) подвергались анодному окислению в потенциостатическом режиме (раствор 0.04 мол/л  $\text{KNO}_3$  в этиленгликоле) до оптимальной толщины  $d_{\text{SiO}_2} \sim 2-3 \text{ нм}$  [5]. Электроннолучевым способом наносилась пленка  $\text{Ti}$  толщиной до 10 нм, на тыльной стороне электрохимически — омический никелевый контакт толщиной до 1 мкм. Слои  $(i) a\text{-Si} : \text{H}$  ( $d=500 \text{ нм}$ ) получались путем разложения 100 % силана в высокочастотном разряде 8 МГц мощностью 5 Вт, площадь электродов  $S=50 \text{ см}^2$ , температура подложки составляла не менее 210 °С, давление в камере — 25 Па, расход газа — 30 Бар·см<sup>3</sup>/мин. Для улучшения омического контакта создавались  $n^+$ -слои толщиной 20 нм путем добавления в камеру 1 %  $\text{PH}_3$ . В качестве барьерного металла магнетронным распылением наносилась  $\text{Pt}$  толщиной, подбираемой для 50 % пропускания (антиотражающие покрытия не использовались). Площадь фоточувствительной структуры  $\text{Ti}-\text{SiO}_2-p\text{-Si}-\text{Ni}$  составляла 0.13 см<sup>2</sup>, а структуры  $\text{Pt}-(i) a\text{-Si} : \text{H}-\text{H}-(n^+) a\text{-Si} : \text{H}-\text{Ti}$  — 0.07 см<sup>2</sup>. Титан использовался, с одной стороны, как барьерный металл к  $p\text{-Si}$  и создавал фотоэлемент поверхностно-барьерного типа, с другой — как омический контакт к  $a\text{-Si} : \text{H}$  и, наконец, с третьей — в качестве электрода к структуре. Наличие третьего электрода позволяет включать оба гетероперехода в независимые электрические цепи. В этом случае условие равенства фототоков для обоих гетеропереходов является несущественным.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

Структуры представляют собой два барьера Шоттки, включенных навстречу друг другу, с высотами барьеров  $\varphi_{B1}=1.2 \text{ эВ}$  ( $\text{Pt}-a\text{-Si} : \text{H}$ ) и  $\varphi_{B2}=0.8 \text{ эВ}$  ( $\text{Ti}-\text{SiO}_2-p\text{-Si}$ ) (рис. 1, а). Поэтому при освещении белым светом  $V_{\text{хх}_1} > V_{\text{хх}_2}$ . С другой стороны,  $I_{\text{кз}_2} > I_{\text{кз}_1}$ , что связано как с большей площадью контактной

структуры  $\text{Ti}-\text{SiO}_x-p\text{-Si}$ , так и с неоптимизированной толщиной верхнего слоя. При оптически и электрически последовательном включении элементов зависимость  $V_{xx}(i_\phi)$  является функцией спектрального состава освещения (рис. 1, а) в отличие от случая одинарного фотоэлемента, когда выполняется соотношение  $V_{xx} = \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{i_\phi}{i_s} + 1\right)$ . При последовательном включении справедливо, что

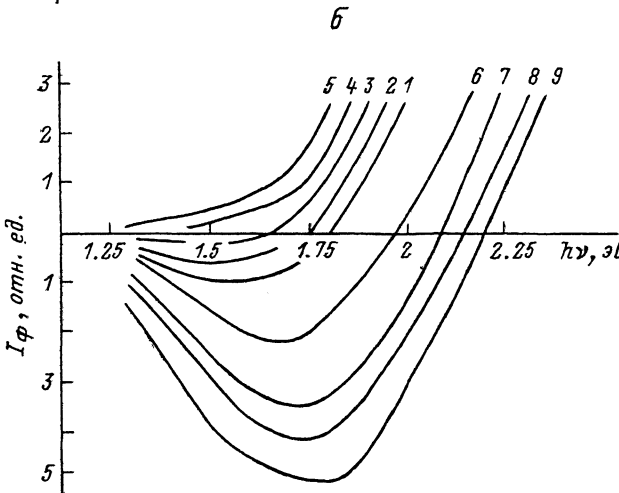
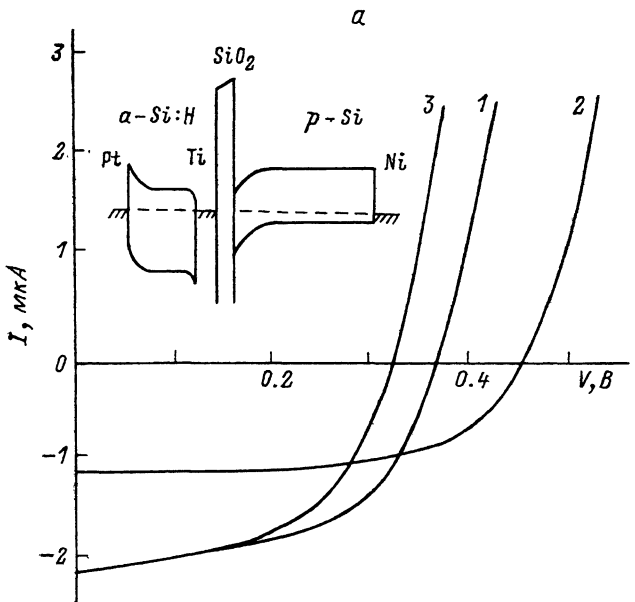


Рис. 1.

а) вольт-амперные характеристики структур при освещении. 1 — освещение светом лампы накаливания 30 мВт/см<sup>2</sup>; 2 — то же, через фильтр СЭС-23; 3 — освещение лампой накаливания с дополнительной ИК подсветкой ( $h\nu = 1.27$  эВ). б) спектральные зависимости фототока структуры  $\text{Pt}-a\text{-Si}: \text{H}-\text{Ti}-\text{SiO}_x-p\text{-Si}-\text{Ni}$  при различных смещениях (относительно Pt-электрода). 1 — 0, 2 — -10, 3 — -20, 4 — -50, 5 — -100, 6 — +10, 7 — +20, 8 — +50, 9 — +100 мВ.

$I_1 = I_2 = I$ ,  $V_1 + V_2 = V$ , и параметры ВАХ будут определяться как  $n = n_1 + n_2$ ,  $\ln i_s = \frac{n_1 \ln i_{s1} + n_2 \ln i_{s2}}{n_1 + n_2}$ . При коротковолновом освещении  $V_{xx}$  определяется барьером  $\text{Pt}-a\text{-Si}: \text{H}$ , длинноволновое освещение увеличивает вклад барьера  $\text{Ti}-p\text{-Si}$ , имеющего большие  $I_{xx}$  и меньшие  $V_{xx}$ .

На рис. 1, б показаны спектральные характеристики фототока структур  $\text{Pt}-(i) a\text{-Si}: \text{H}-(n^+) a\text{-Si}: \text{H}-\text{Ti}$ ,  $\text{Ti}-p\text{-Si}-\text{Ni}$  при сквозном включении. Видно, что падение напряжения на структуре, фотоэдс ( $V_{xx}$ ) структуры при

сквозном включении зависят не только от интенсивности освещения ( $I_{\text{ка}}$ ),  $n^0$  и от его спектрального состава. При освещении светом с энергией  $\varepsilon_{g2}(\text{Si}) < < h\nu < \varepsilon_{g1}(a\text{-Si} : \text{H})$  фототок и фотоэдс обусловлены вкладом структуры Ti—

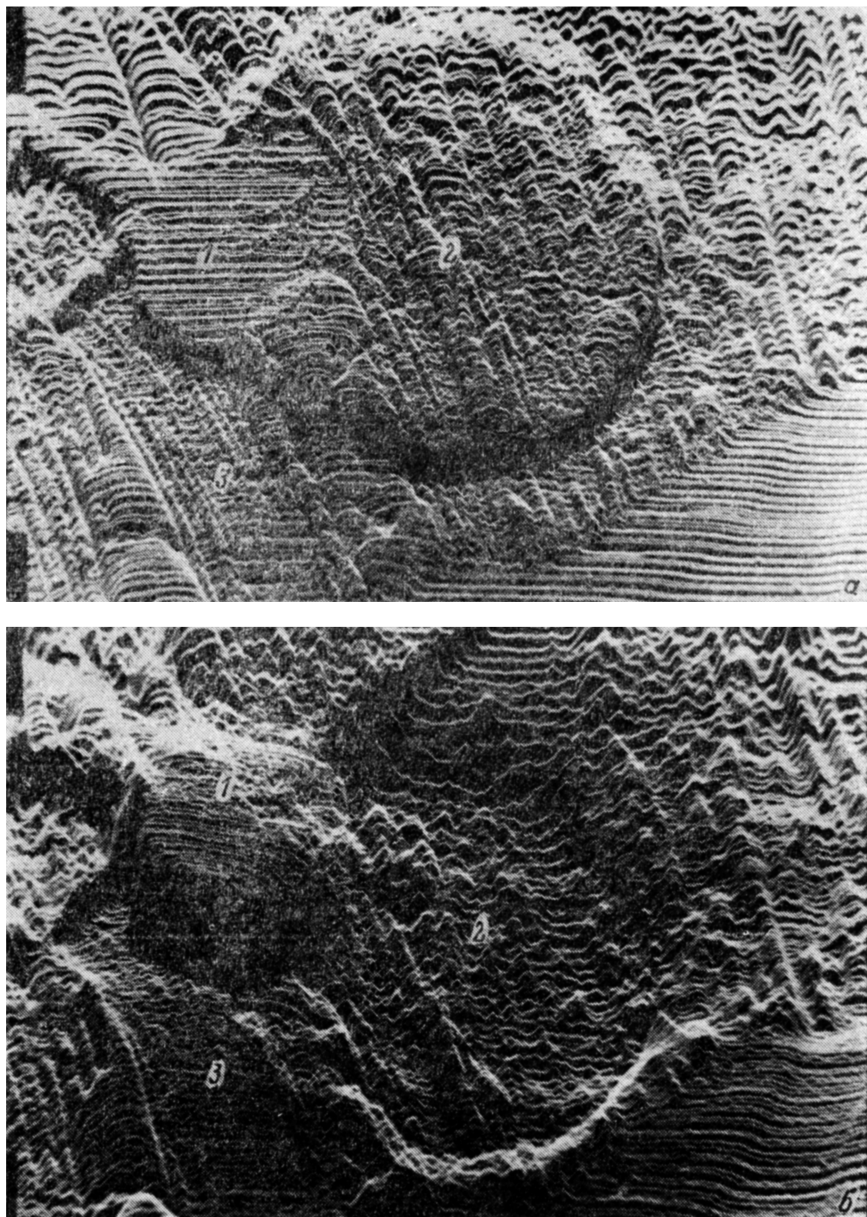


Рис. 2. EBIC-распределение исследуемых структур при сквозном включении.  
 V, В: а — 0, б — 3 (на платиновом электроде).

$p\text{-Si—Ni}$ . Однако, поскольку проводимость нефотовозбужденного  $a\text{-Si} : \text{H}$  очень мала, сквозной фототок в этом случае мал.

При  $h\nu > \varepsilon_{g1}(a\text{-Si} : \text{H})$  фототок и фотоэдс обусловлены совместным вкладом  $a\text{-Si} : \text{H}$  и  $p\text{-Si}$ , при переходе к более коротким длинам волн вклад структуры на  $a\text{-Si} : \text{H}$  увеличивается. Из-за малой темновой проводимости аморфного

кремния сквозной фототокоток полярности, соответствующей вкладу Si, удаётся получить лишь при шунтировании структуры  $a\text{-Si} : \text{H}$  некоторым сопротивлением.

Приложение внешнего смещения к структуре Pt (...) Ni приводит одновременно к изменению фотоактивных барьеров в монокристаллическом и аморфном кремнии (один из них увеличивается, другой уменьшается) и, следовательно, к сдвигу спектральной зависимости фототока при сквозном включении по оси  $h\nu$ .

Инверсия знака фототока за счет изменений высот барьеров при внешнем смещении хорошо наблюдается при исследовании распределения токов, наведенных электронным лучом (ЕВІС-распределения). ЕВІС-распределение исследовалось на установке BS 300 «Tesla» и представлено на рис. 2. При  $V=0$  видна разнонаковость фотоэда барьеров Pt— $a\text{-Si} : \text{H}$  (участок 2) и Ti— $p\text{-Si}$  (участок 3) относительно нулевого сигнала, получаемо при сканировании токоотводящей металлизации, практически непрозрачной для луча электронов (участок 1). Приложение внешнего смещения с положительным потенциалом на Pt на участке 2 приводит к инверсии знака фототока от  $a\text{-Si} : \text{H}$ . При этом наблюдается переход от режима барьерной фоточувствительности к объемной фотопроводимости [6]. На участке 3 видно увеличение фототока от барьера на  $p\text{-Si}$ .

Необходимо отметить, что фотодиодные структуры, состоящие из двух изотипных гетеропереходов с двойным обеднением, с управляемой спектральной характеристикой, уже исследовались ранее, например в [7, 8]. По сравнению с ними исследуемая структура характеризуется как широким диапазоном перестройки  $h\nu_{\text{гг}}$  ( $i_{\text{ф}}=0$ ) от 1.4 до 2.2 эВ, так и возможностью использования ее в качестве каскадных фотоэлементов. Данные структуры можно использовать и в качестве пирометра с нулевой индикацией.

Для эффективного использования этих структур в качестве каскадного солнечного элемента необходимо подключать элементы в отдельные цепи. Эффективность Si-элемента за  $a\text{-Si} : \text{H}$ -фильтром понижается примерно на 40–50 %. КПД используемых  $a\text{-Si} : \text{H}$ -элементов колеблется в пределах 1.5–2 %. Поэтому общий КПД каскадной структуры не увеличивается по сравнению с одинарным фотоэлементом. Однако простой расчет показывает, что при использовании более эффективных элементов на аморфном кремнии с КПД 8–10 % и КПД одинарного кремниевого элемента с КПД 10 % получим, что общий КПД может быть равен  $0.6 \cdot 10 + 8 \cdot 10 = 14 \cdot 16$  %, т. е. эффективность может существенно повыситься.

Таким образом, в работе получены следующие результаты:

— показана возможность управления спектральной характеристикой фототока в исследуемой каскадной структуре с переменной знака сквозного фототока в широком спектральном диапазоне путем приложения внешнего смещения благодаря изменению высот барьеров при встречном включении;

— определена возможность создания эффективного фотопреобразователя каскадного типа с включением составляющих его фотоэлементов в отдельных электрических цепях, для которого несущественны требования, предъявляемые к гетеропереходам.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Loferski J. J. // Conf. Rec. IEEE Photovoltaic Spec. 1976. V. 12. P. 957–964.
- [2] Fan J. C. C., Palm B. J. // Sol. Cells. 1983. V. 10. P. 81–98.
- [3] Fonash S. J., Rothwarf A. // Current Topic in Photovoltaics / Ed. T. J. Coutts, J. D. Meakin. London, 1985. P. 15–61.
- [4] Шарма Б. Л., Пурохит Р. К. Полупроводниковые гетеропереходы. М., 1979. 232 с.
- [5] Вуль А. Я., Саченко А. В. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 8. С. 1361.
- [6] Комиренко Р. П., Кильчицкая С. С., Скрышевский В. А., Стриха В. И. // Поверхность. 1986. № 3. С. 148–150.
- [7] Рудь Ю. В., Таиров М. А. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 2. С. 101–105.
- [8] Wolfenbittel R. F. // Sensors and Activators. 1989. V. 17. N 1-2. P. 249–261.