

06.1;06.2;06.3;12

©1994

## ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКУЮ И ФОТОДИОДНУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ТУННЕЛЬНЫХ СТРУКТУР Pd-SiO<sub>2</sub>-*n*(*p*)-Si

*С.В.Слободчиков, Г.Г.Ковалевская, Х.М.Салихов*

Ранее в [1] были изложены результаты экспериментальных исследований по использованию фоточувствительных туннельных диодных структур Pd-SiO<sub>2</sub>-*n*(*p*)-Si как детекторов водорода. Было показано, что изменение фотоэдс в атмосфере водорода может почти на два порядка превосходить изменение темнового тока, и Si-МДП фотодетектор может служить эффективным детектором водорода. В [2] выявлено умножение фототока в этих структурах при обратном смещении, достигающее величин ~ 10-100. В настоящем сообщении приведены данные по влиянию водорода на фотоответ в фотовольтаическом (без смещения) и фотодиодном (при обратном смещении) режимах, позволяющие сделать сравнительную оценку обоих для измерения концентрации водорода и водородосодержащих газов.

Туннельные диодные структуры Pd-SiO<sub>2</sub>-*n*(*p*)-Si создавались, как и в [1,2], на кристаллах *n*-Si с  $\rho = 7.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и ориентацией (111), и *p*-Si с  $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  ориентации (100). Слои SiO<sub>2</sub> выращивались в результате выдержки на воздухе кристаллов при комнатной температуре и толщина их была в пределах 22-24 Å. Палладий наносился напылением в вакууме и толщина его слоев составляла 400-500 Å. Измерялся фотоответ при освещении монохроматическим светом с  $\lambda = 0.90 \text{ мкм}$ . На рис. 1,б представлены зависимости фототока короткого замыкания от обратного смещения для двух образцов туннельных структур Pd-SiO<sub>2</sub>-*n*-Si, снятые на воздухе без водорода (кривые 1, 2) и при импульсном воздействии H<sub>2</sub> (кривые 3, 4). Примечательным для этих кривых является характер изменения фототока в атмосфере H<sub>2</sub>: если в фотовольтаическом режиме и малых смещениях фототок убывает, то при более высоких напряжениях наблюдается его резкое возрастание. Совершенно противоположная картина изменения фототока в атмосфере водорода характерна для туннельных структур Pd-SiO<sub>2</sub>-*p*-Si (рис. 2).

Остановимся вначале на фотовольтаическом режиме измерений в образцах Pd-SiO<sub>2</sub>-*n*-Si. Изменение фотоэдс ра-

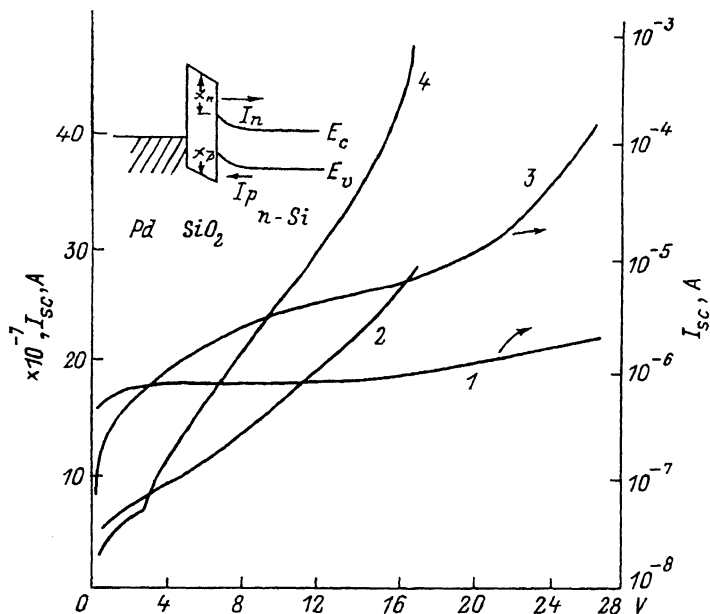


Рис. 1.

*a* — зонная схема структуры Pd-SiO<sub>2</sub>-n-Si;

*b* — зависимость фототока от обратного смещения для двух образцов туннельных диодных структур Pd-SiO<sub>2</sub>-n-Si: образец 1 — кривые 1 (без H<sub>2</sub>) и 3 (с H<sub>2</sub>); образец 2 — кривые 2 (без H<sub>2</sub>) и 4 (с H<sub>2</sub>).

замкнутой цепи под влиянием водорода для образца 1, например, составляет  $V_{oc}^0/V_{oc}^{H_2} \approx 66$ . Поскольку  $V_{oc} \approx I_{sc} R_0$ , то это изменение может быть связано с уменьшением как тока короткого замыкания  $I_{sc}$ , так и дифференциального сопротивления в нуле смещения  $R_0$ . Падение  $I_{sc}$  для того же образца 1 составляет  $I_{sc}^0/I_{sc}^{H_2} \approx 7.5$ , и тогда  $R_0^0/R_0^{H_2} \approx 9$ . Подобный же характер изменений этих параметров наблюдается и в образце 2.

Эти результаты могут быть объяснены с учетом изменений высот барьеров для неосновных и основных носителей тока. Ток короткого замыкания, обусловленный неосновными носителями, дырками, может быть представлен [3]

$$I_{sc} \approx \frac{I_{sco}}{1 + D_s \sigma_p f_s \exp(b_p \chi_p^{1/2} d)}, \quad (1)$$

где  $I_{sco}$  — ток при толщине SiO<sub>2</sub>  $d = 0$ ,  $D_s$  — плотность поверхностных состояний,  $\sigma_p$  — сечение захвата дырок,  $f_s$  — вероятность заполнения для поверхностных состояний,  $b_p$  — константа туннелирования,  $\chi_p$  — высота барьера для дырок.

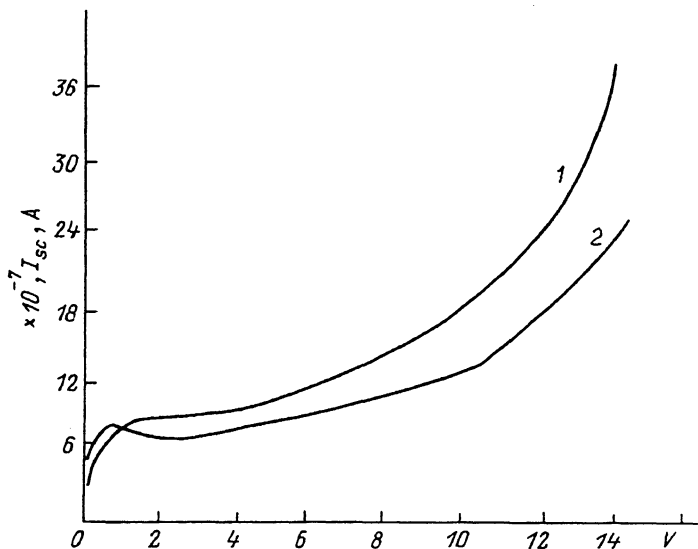


Рис. 2. Зависимость фототока от обратного смещения туннельной структуры Pd-SiO<sub>2</sub>-p-Si: кривая 1 — без H<sub>2</sub>, кривая 2 — с H<sub>2</sub>.

Как показали измерения вольтемкостных характеристик [1], высоты барьеров  $\chi_n$  и  $\chi_p$  (рис. 1, a) в атмосфере водорода изменяются вследствие уменьшения работы выхода палладия: без H<sub>2</sub>  $\chi_n = 3.25$  эВ,  $\chi_p = 3.65$  эВ [3] и  $\chi_n = 2.75$  эВ,  $\chi_p = 4.17$  эВ — в атмосфере H<sub>2</sub>. В этой связи оценка  $I_{sc}^0/I_{sc}^{H_2}$  по (1) с  $b = 0.51$  и  $d = 24$  Å при условии, что  $D_s \sigma_p f_s \exp(b_p \chi_p^{1/2} d) \gg 1$ , дает значение  $\approx 32$ , что превышает в 4 раза экспериментальное значение для образца 1 и лишь на 70% для образца 2. Это несоответствие можно отнести за счет изменения предэкспоненциального множителя  $D_s \sigma_p f_s$ , так как в некоторых работах [4,5] подчеркивалось изменение плотности поверхностных состояний в интерфейсе и образование новых уровней ловушек в атмосфере H<sub>2</sub>, естественно с другими значениями  $\sigma_p$  и  $f_s$ .

Очевидно, что дифференциальное сопротивление, определяемое основными носителями (электронами),  $R_0 \sim \sim \exp(b_n \chi_n^{1/2} d)$  и оценка изменения его  $R_0^0/R_0^{H_2}$  дает значение  $\approx 10$  в хорошем соответствии с экспериментом.

Аналогичный анализ может быть применен и в отношении структур Pd-SiO<sub>2</sub>-p-Si с учетом, однако, обратного изменения высот барьеров из-за возрастания работы выхода

палладия в атмосфере  $H_2$ . Приложение обратного смещения, как было показано в [2], приводит к эффекту умножения фототока в исследованных туннельных структурах. Из рис. 1 и 2 следует, что это усиление фототока характерно и для газовой сферы с водородом, хотя и с другими численными значениями. Коэффициент усиления, например, для структур  $Pd-SiO_2-n-Si$  определяется как  $M = 1 + I_n/I_p$  и теоретически при значениях высот барьеров, характерных для наших структур, не может быть рассчитан [2]. Вследствие изменения высот барьеров  $Pd-SiO_2$  и  $SiO_2-Si$  в газовой смеси с водородом кривые фототока на рис. 1 и 2 можно формально рассматривать как принадлежащие к структурам с металлами, различающимися работами выхода. При этом структура  $Pd-SiO_2-n-Si$  имеет более оптимальное соотношение высот барьеров, и коэффициент усиления (в частности, для образца 1) составляет  $M = 2700$  в атмосфере  $H_2$ . Для структур  $Pd-SiO_2-p-Si$  изменение высот барьеров в водороде менее благоприятно, и усиление фототока невелико  $\sim 6 - 10$  и снижено по сравнению с измеренными значениями в газовой среде без  $H_2$ .

Относительно слабый рост фототока в этих структурах при невысоких смещениях, вероятно, связан со значительным вкладом генерационно-рекомбинационной компоненты тока области истощения в общий ток  $I = I_{g-r} + I_{tun}$ , и только после 12-14 В  $I_{tun} \gg I_{g-r}$ .

Таким образом, оценивая оба способа детектирования водорода с помощью туннельных структур  $Pd-SiO_2-n(p)-Si$ , отметим следующее. В фотовольтаическом режиме чувствительность структур на основе  $n-Si$ , как отмечалось и ранее в [1], выше, чем на основе  $p-Si$ . Усиление фототока в фотодиодном режиме для первых структур в атмосфере  $H_2$  также существенно выше, чем во вторых. В обоих режимах это превосходство составляет почти порядок величины. Далее, уже в предпочтительных структурах  $Pd-SiO_2-n-Si$  чувствительность по абсолютной величине выше в фотодиодном режиме в условиях высокого умножения носителей тока при оптимальном обратном смещении. Недостатком метода является необходимость приложения этого смещения, и поэтому, в зависимости от конкретных условий применения, фотовольтаический режим может иметь преимущества, учитывая, что при оптимизации технологии чувствительность может быть очень высока, как отмечалось в [1].

## Список литературы

- [1] Ковалевская Г.Г., Мередов М.М., Руссу Е.В., Салихов Х.М., Слободчиков С.В. // ЖТФ. 1993. Т. 63. В. 2. С. 185-190.
- [2] Слободчиков С.В., Ковалевская Г.Г., Пенцов А.В., Салихов Х.М. // ФТП. 1993. Т. 27. В. 7. С. 1213-1216.
- [3] Srivastawa G.P., Bhatnagar P.K., Dhariwal S.R. *Sol.-St. Electr.* 1979. V. 22. P. 581-587.
- [4] Keramati B., Zemel J.N. // *J. Appl. Phys.* 1982. V. 53. N 2. P. 1091.
- [5] Petty M.C. // *Electr. Lett.* 1982. V. 18. N 8. P. 314.

Физико-технический институт  
им. А.Ф.Иоффе  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
30 ноября 1993 г.  
В окончательной редакции  
1 апреля 1994 г.