

06;07

## **Фотоэлектрический преобразователь нового типа на основе гетероструктуры $n\text{-CdO}/a\text{-C}/p\text{-Si}$**

© А.М. Баранов, Ю.А. Малов, С.А. Терешин

Государственный научно-исследовательский институт  
вакуумной техники им. С.А. Векшинского, Москва

Поступило в Редакцию 17 апреля 1997 г.

Предлагается новая схема фотоэлектрического преобразователя и на примере гетероструктуры  $n\text{-CdO}/a\text{-C}/p\text{-Si}$  исследуются ее фотоэлектрические свойства. Отличительной особенностью структуры является то, что широкозонный диэлектрический слой  $\text{SiO}_2$  на поверхности кремния заменен на узкозонный слой аморфного углерода, а в качестве верхнего электрода использован слой CdO.

Показано, что в подобной гетероструктуре можно ожидать увеличение тока короткого замыкания вследствие ударной ионизации. Результаты работы позволяют сделать вывод о целесообразности практического использования пленок CdO в качестве прозрачных электродов.

В последнее время все более важной становится задача получения экологически чистой электроэнергии за счет преобразования солнечного излучения. Поэтому создание и исследование новых материалов и способов прямого преобразования света в электроэнергию представляется весьма актуальным, учитывая, что для самого широко используемого в солнечной энергетике материала—кремния уже почти достигнут предел по эффективности [1–3].

В работе предлагается новая схема фотоэлектрического преобразователя, позволяющая увеличить ток короткого замыкания благодаря как

созданию условий для ударной ионизации, так и увеличению внутреннего квантового выхода преобразователя в коротковолновой области.

Схема энергетической зонной диаграммы преобразователя показана на рис. 1. Суть предлагаемой схемы фотоэлектрического преобразователя состоит в следующем. При формировании элемента между двумя слоями  $p$ - (П1) и  $n$ - (П3) типа, имеющими разную ширину запрещенной зоны, располагают промежуточный полупроводниковый слой (П2), в котором имеется сильное электрическое поле. Назначение слоя — обеспечить разогрев носителей заряда и их перенос без рассеяния между слоями  $n$ - и  $p$ -типа. При этом фотогенерируемые носители могут приобрести энергию, достаточную для ударной ионизации, что приведет к дополнительной генерации носителей заряда.

Для того чтобы обеспечить выполнение этих условий, параметры слоев гетероструктуры должны быть выбраны исходя из следующих соображений.

Ширина запрещенной зоны ( $E_{g3}$ ) слоя П3, на который падает солнечный свет, должна быть больше, чем  $E_{g1}$ , чтобы обеспечить эффект "окна". В данном преобразователе слой П3 сформирован на основе полупроводника с  $E_{g3} \approx 2.5$  eV. В солнечном спектре есть кванты света с энергией  $E > E_{g3}$ , которые будут поглощаться в слое П3. Кванты света с  $E < E_{g3}$  проходят через слой 3 и если их энергия будет больше  $E_{g1}$ , поглощаются в слое П1. Ширина запрещенной зоны  $E_{g3}$  выбрана такой, чтобы неосновные носители, двигаясь из П3 в П1, приобретали на границе раздела П3–П2 энергию, достаточную для ударной ионизации в слое П1.

Условия возникновения ударной ионизации обеспечиваются при выполнении соотношения  $(3/2)E_{g1} < E_{g3} - \eta_1 - U_1$ , в котором  $U_1$  — напряжение, соответствующее изгибу зон в П1;  $\eta_1$  — разность между энергией Ферми и энергией потолка валентной зоны в П1.

Чтобы уменьшить последовательное сопротивление преобразователя (а следовательно, увеличить фактор заполнения) и увеличить собирание носителей, слой П3 может быть выполнен на основе сильнолегированного полупроводника. Кроме того, толщина слоя П3 выбирается такой, чтобы он являлся антиотражающим покрытием к слою П1. Следовательно, полупроводниковый слой П3 является:

- антиотражающим покрытием от отношению к слою П1,
- собирающим носители заряда с поверхности преобразователя,
- генерирующим электрон-дырочные пары за счет поглощения света в "синем" диапазоне видимого солнечного спектра.

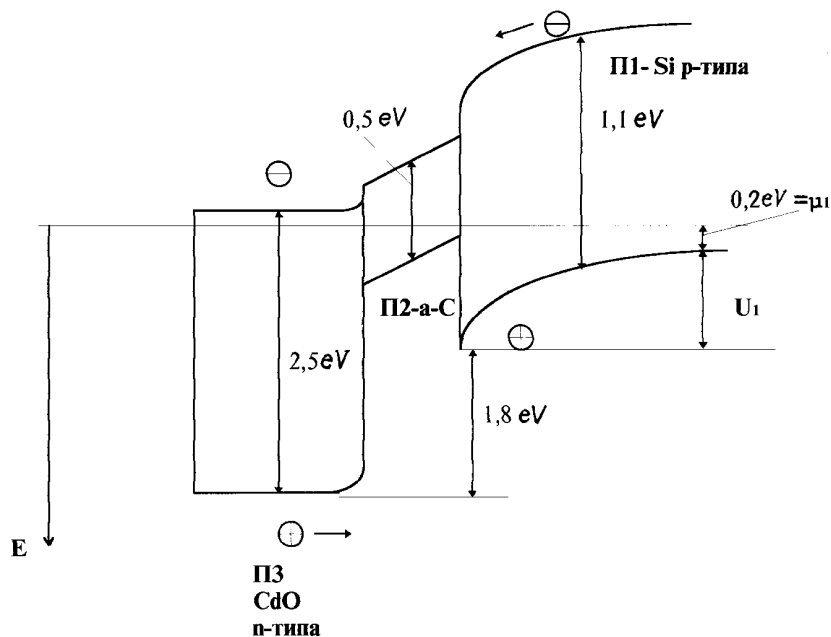
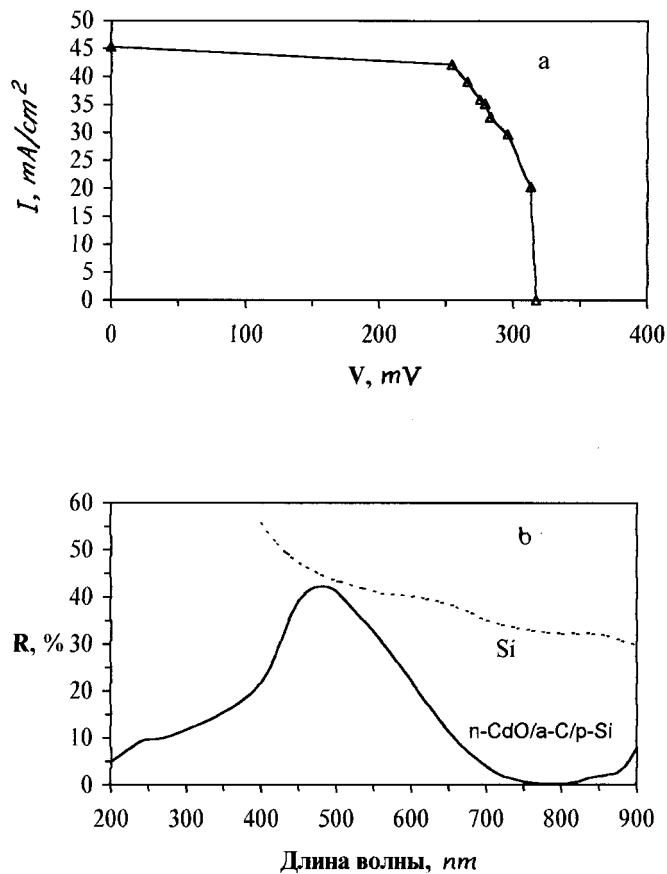


Рис. 1. Схема энергетической зонной диаграммы.

Данная структура похожа на МДП-структуру наличием в ней тонкого промежуточного слоя П2 между слоями П1 и П3. Наличие тонкого диэлектрического слоя в структуре металл–диэлектрик–полупроводник позволяет увеличить напряжение холостого хода  $V_{xx}$  по сравнению с барьером Шоттки за счет встроенного положительного заряда [4]. В то же время этот слой (в любом случае) препятствует движению носителей заряда из-за наличия потенциального барьера на границе слоев. Поэтому в рассматриваемой структуре широкозонный диэлектрический слой заменен на узкозонный полупроводниковый слой. Параметры слоя П2 должны быть такими, чтобы обеспечить перенос носителей заряда через него в баллистическом режиме (т. е. длина свободного пробега носителей в слое П2 должна быть больше толщины слоя, а  $E_{g2} < E_{g1}$ ). Таким образом, соотношение между запрещенными зонами слоев следующее:  $E_{g3} > E_{g1} > E_{g2}$ .

1\* Письма в ЖТФ, 1997, том 23, № 21



**Рис. 2.** Вольт-амперная характеристика структуры  $n\text{-CdO}/a\text{-C}/p\text{-Si}$  при освещении солнечным светом интенсивностью  $0.1 \text{ W/cm}^2$  (а) и зависимости коэффициента отражения ( $R$ ) от длины волны для ФЭП и для чистого кремния (б).

Особенность физических процессов, лежащих в основе функционирования предлагаемого преобразователя, заключается в следующем. Скачки потенциалов на границах раздела между П1 и П2 и между П2 и П3 обеспечивают разогрев электронов и дырок. Если при пролете слоя П2 горячие баллистические электроны и дырки не испытывают

рекомбинации или рассеяния, то дырки, входя в слой П1, имеют энергию, достаточную для генерации электронно-дырочных пар. Это приводит к увеличению тока короткого замыкания.

При создании фотоэлектрического преобразователя мы исходили из имеющихся в нашем распоряжении материалов и технологий. Поэтому в качестве материала слоя П1 был выбран кремний с дырочной проводимостью (КДБ-10). Толщина пластины составляла  $330 \mu\text{m}$ ,  $E_{g1} = 1.1 \text{ eV}$ . Промежуточный слой П2 выполнен из аморфного углерода ( $a\text{-C}$ ) толщиной  $30 \text{ \AA}$  и  $E_{g2} = 0.5 \text{ eV}$ . Толщина  $a\text{-C}$  контролировалась непосредственно в процессе осаждения [5,6]. В качестве второго крайнего слоя П1  $n$ -типа был взят широкозонный полупроводник  $\text{CdO}$  с шириной запрещенной зоны  $2.5 \text{ eV}$  [7,8] и толщиной приблизительно  $800 \text{ \AA}$ . Слои аморфного углерода были получены магнетронным распылением графита в аргоне, а  $\text{CdO}$  в атмосфере азота с кислородом. Активная площадь фотоэлектрического преобразователя составляла  $S = 0.64 \text{ cm}^2$ . Слой  $\text{CdO}$  состоял из двух областей с разным удельным сопротивлением. Первая область (вблизи границы раздела П3–П2) шириной  $100 \text{ \AA}$  имела удельное сопротивление  $\approx 1 \Omega \cdot \text{cm}$ , а вторая  $\rho = 5 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ . Изменение удельного сопротивления было осуществлено за счет изменения концентрации кислорода в  $\text{CdO}$  [8]. Создание двух областей было вызвано необходимостью ввести тянущее электрическое поле внутрь слоя  $\text{CdO}$  с тем, чтобы увеличить сбор носителей заряда, генерированных в  $\text{CdO}$ .

На рис. 2, *a* показана вольт-амперная характеристика структуры  $n\text{-CdO}/a\text{-C}/p\text{-Si}$  при освещении солнечным светом интенсивностью  $0.1 \text{ W/cm}^2$ . Видно, что, несмотря на небольшое  $V_{\text{xx}} = 0.32 \text{ V}$ , ток короткого замыкания соответствует значениям, полученным у лучших солнечных элементов на основе кремния [1,2]. КПД структуры составляет  $\sim 11.5\%$ . При отсутствии слоя  $a\text{-C}$  ток короткого замыкания был в несколько раз меньше, что, возможно, связано с высокой плотностью пограничных состояний. На рис. 2, *b* показаны зависимости коэффициента отражения ( $R$ ) от длины волны для данной структуры (кривая 1) и для чистого кремния (кривая 2). Видно, что  $R$  практически равен 0 на длине волны  $800 \text{ nm}$ .

Из сказанного выше следует, что, несмотря на неоптимальность описанной экспериментальной гетероструктуры, она показывает перспективность предложенной схемы фотоэлектрического преобразователя для дальнейших исследований.

## Список литературы

- [1] *Gtauvogl M., Aberle A.G.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 69. P. 1462–1464.
- [2] *Zhao J., Wang A.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 66. N 26. P. 3636–3638.
- [3] *Solar Cells and Their Industrial Application* // *Advances in aterials Technology: Monitor*, UNIDO. 1993. Issue N 31. P. 2–36.
- [4] *Zu C.* Физика полупроводниковых приборов.
- [5] *Baranov A., Tereshin S., Mikhailov I.* et al. // *Proc. SPIE.* 1996. V. 2863. P. 359–367.
- [6] *Baranov A., Tereshin S., Mikhailov I.* et al. *Proc. SPIE.* 1995. V. 2519. P. 108–115.
- [7] *Chu T.L., Shirley S.* // *Journal of Electr. Mater.* 1990. V. 19. N 9.
- [8] *Scavani C., Reddy K.T.R.* // *Semicond. Sci. and Technol.* 1991. N 6. P. 1036–1040.