

- [10] Voronkov V. V. // J. Cryst. Growth. 1982. V. 59. P. 625—643.  
 [11] Шейхет Э. Г., Червоный И. Ф., Фалькевич Э. С. // Высококичст. вещества. 1989. № 2. С. 50—55.  
 [12] Критская Т. В., Неймарк К. Н., Шкляр Б. Л. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1986. Т. 22. В. 6. С. 1038—1039.  
 [13] Kimerling L. C., DeAngelis H. M., Diebold J. W. // Sol. St. Commun. 1975. V. 16. N 1. P. 171—174.  
 [14] Лугаков П. Ф., Лукьяница В. В. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 1. С. 166—168.  
 [15] Емцев В. В., Машовец Т. В. Преси и точечные дефекты в полупроводниках. М., 1981. 248 с.  
 [16] Лугаков П. Ф., Лукашевич Т. А., Шуша В. В. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 2. С. 401—404.

Научно-исследовательский институт  
 прикладных физических проблем  
 им. А. Н. Севченко при БГУ им. В. И. Ленина  
 Минск

Получено 25.10.1991  
 Принято к печати 16.01.1992

ФТП, том 26, вып. 6, 1992

## ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК $\alpha$ -Si : H-ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ЗЕРКАЛЬНО ОТРАЖАЮЩИМ ТЫЛЬНЫМ КОНТАКТОМ

Манаков С. М., Таурбаев Т. И.

Изменения свойств аморфного гидрогенизированного кремния ( $\alpha$ -Si : H) с температурой оказывают существенное влияние на фотоэлектрические характеристики приборов, изготовленных на его основе [1].

Цель настоящей работы — исследование влияния температуры на фотоэлектрические характеристики структур на основе  $\alpha$ -Si : H с зеркально отражающим тыльным контактом.

С повышением температуры оптическая ширина запрещенной зоны  $E_g$   $\alpha$ -Si : H уменьшится с температурным коэффициентом  $\gamma = -(4.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$  эВ/К при температурах, превышающих 200 К для всех образцов  $\alpha$ -Si : H независимо от метода его получения [2]. Таким образом, температурную зависимость  $E_g(T)$  можно выразить соотношением

$$E_g(T) = E_g^0 + \gamma(T - T_K), \quad (1)$$

где  $E_g^0$  — оптическая ширина запрещенной зоны при комнатной температуре  $T_K$ .

С учетом интерференции между падающим и отраженным от тыльного контакта светом и, принимая во внимание соотношение, описывающее спад коротковолновой чувствительности из-за диффузии носителей против электрического поля [3], в работе [4] мы получили выражение для спектральной зависимости коэффициента сбора:

$$Q(\lambda) = 1 - \exp(-\alpha W) + \frac{\sqrt{R}}{2\pi} \lambda \alpha \exp(-2\alpha d) \left\{ \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} dn\right) - \right. \\ \left. - \sin\left[\frac{4\pi}{\lambda}(d - W)n\right] \right\} + R \exp(-2\alpha d) [\exp(\alpha W) - 1] - 1/(1 + eV_b/\alpha WkT), \quad (2)$$

где  $R$  — коэффициент отражения тыльного контакта;  $\alpha$  и  $n$  — коэффициенты поглощения и преломления  $\alpha$ -Si : H, зависящие от длины волны  $\lambda$ ;  $W$  и  $d$  — толщины области сбора и слоя  $\alpha$ -Si : H соответственно;  $V_b$  — встроенный потенциал;  $e$  — заряд электрона. Изготовление исследуемых структур ( $\text{SnO}_2$ — $\alpha$ -Si :

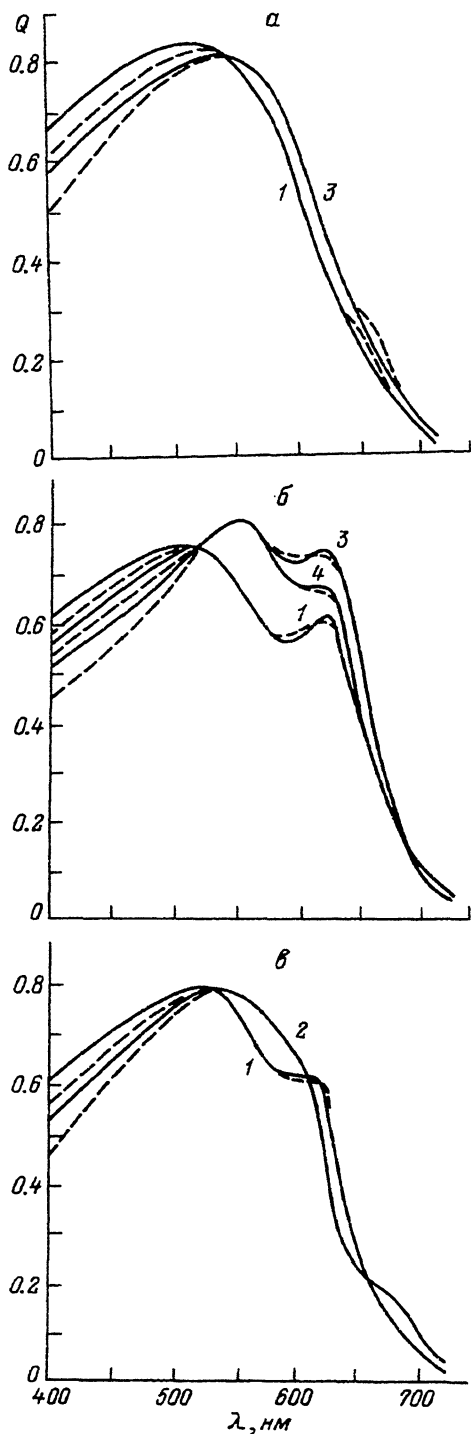


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициента собирания фотопреобразователей на основе  $\alpha\text{-Si}:\text{H}$  с поглощением (а) и зеркально отражающим (б, в) тыльным контактом.

Сплошные линии — расчет, штриховые — эксперимент. Толщина  $d$ , мкм: б — 0,35, в — 0,5. Т, К: 1 — 293, 2 — 313, 3 — 323, 4 — 343.

$\text{H-Me}$ ) и определение численных значений  $\alpha(\lambda)$ ,  $n(\lambda)$ ,  $d$ ,  $R$ ,  $W$ ,  $V_b$  подробно описаны в [4].

Измерение спектральных характеристик осуществлялось на модифицированном комплексе КСВУ-23 по модуляционной методике в автоматическом режиме с шагом 5 нм при скорости развертки 100 нм/мин, и погрешность измерений не превышала 1,5%. Управление измерениями, запись спектров фототока исследуемого образца и эталона, их сравнение и все необходимые математические вычисления производились с помощью ЭВМ.

Применимость выражения (2) для исследования влияния температуры на спектральную зависимость коэффициента собирания была проверена на структуре без отражающего тыльного контакта ( $R=0$ ), параметры которой принимали те же значения, что и для структуры с отражением, в частности, среднее значение  $W$  составляло 0,22 мкм.

Для структуры без тыльного отражения с увеличением температуры наблюдаются сдвиг спектральной чувствительности в длинноволновую область и уменьшение чувствительности в коротковолновой области (рис. 1, а). Использование выражения (2) для расчета  $Q(\lambda)$  с учетом температурной зависимости ширины запрещенной зоны в виде (1) показало, что зависимости  $E_g = f(T)$  недостаточно для описания температурного изменения коэффициента собирания. Расчетные значения  $Q(\lambda)$  в данном случае показали меньшие температурные изменения по сравнению с наблюдаемыми экспериментально. Для адекватного описания температурного изменения коэффициента собирания для серии фотоэлементов в соответствии с [5] определялись значения толщины области

собирания при различных температурах.

Зависимость  $W = f(T)$ , найденная экспериментально, при температурах, меньших 323 К, близка к линейной с коэффициентом  $8,6 \cdot 10^{-4}$  мкм/К, а при

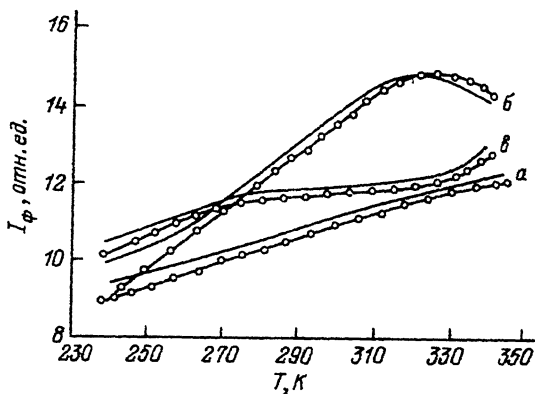


Рис. 2. Температурные зависимости фототока  $I_{\text{ф}}$  а—в (см. подпись к рис. 1).

Сплошные линии — расчет, точки — эксперимент.

больших температурах имеет тенденцию к насыщению. Представленные на рис. 1, а расчетные зависимости  $Q(\lambda)$  для разных температур хорошо согласуются с экспериментальными значениями, различия в коротковолновой области вызваны недостаточно корректным предположением об однородности электрического поля в пределах области собирания.

В структурах с отражающим тыльным контактом с ростом температуры также происходит уменьшение  $Q(\lambda)$  в коротковолновой области, однако на наблюдаемое увеличение коэффициента собирания в длинноволновой области значительное влияние оказывает интерференция света, проявление которой в свою очередь зависит от толщины слоя  $a\text{-Si:H}$  и толщины области собирания. Для элемента с толщиной слоя  $a\text{-Si:H}$   $d = 0.35$  мкм, как показано на рис. 1, б, наблюдается локальное уменьшение  $Q(\lambda)$  в области 580—650 нм при температурах, превышающих 323 К. Особый интерес представляет температурное изменение спектральной зависимости  $Q(\lambda)$  для толщины  $d = 0.5$  мкм (рис. 1, в). В этом случае увеличение  $Q(\lambda)$  с температурой в диапазоне 550—610 нм сопровождается уменьшением коэффициента собирания в области 620—660 нм, т. е. для данной толщины интерференционные явления в некоторой степени стабилизируют температурные изменения  $Q(\lambda)$ .

На рис. 2 представлены зависимости фототока от температуры, пересчитанные на 100% пропускания фронтального контакта, структур, спектральные характеристики которых изображены на рис. 1. Освещение образцов осуществлялось с помощью стабилизированного источника типа А, а расчетные значения получены с учетом спектра этого источника, который описывается формулой Планка для излучения абсолютно черного тела:

$$\rho(\lambda) = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{\exp(hc/k\lambda T_s - 1)}, \quad (3)$$

где  $c$  — скорость света,  $h$  — постоянная Планка,  $T_s = 2856$  К — цветовая температура источника излучения типа А.

Отметим, что температурные зависимости экспериментальных значений фототока и рассчитанных с использованием выражения (3) для измеренных спектральных зависимостей  $Q(\lambda)$  совпадают. Значения фототока, полученные из расчетных зависимостей  $Q(\lambda)$ , несколько превышают экспериментальные из-за различия в коротковолновой области (рис. 2).

Для структур с «толстым» слоем  $a\text{-Si:H}$  ( $d \geq 1$  мкм) вклад фотонов, отраженных от тыльного контакта, в увеличение  $Q(\lambda)$  менее значителен благодаря поглощению света в «мертвом» слое толщиной  $d - W$ , и характер температурной

зависимости фототока повторяет аналогичную зависимость для случая  $R = 0$  (рис. 2, а).

Интерференционные эффекты, как видно из рис. 2, оказывают значительное влияние на температурные зависимости фототока, усиливая ее (кривая б) или ослабляя (кривая в), и для данного качества пленок  $a\text{-Si} : \text{H}$  толщина  $d = 0.5$  мкм является оптимальной для изготовления фотоэлементов с улучшенной температурной стабильностью. Температурный коэффициент изменения фототока, определяемый как

$$TK = \frac{I_{\phi 2} - I_{\phi 1}}{I_{\phi 1} (T_2 - T_1)} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $I_{\phi 1}$ ,  $I_{\phi 2}$  — значения фототока при температурах  $T_1$  и  $T_2$  соответственно, для структур с поглощающим свет тыльным контактом составляет  $0.3\%$  К в температурном диапазоне  $283\text{—}313$  К, что близко к значению  $TK$  для фотодиодов на основе  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  [6] и  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  [7], имеющего примерно такую же, как и у  $a\text{-Si} : \text{H}$ , ширину запрещенной зоны ( $\approx 1.8$  эВ). Использование отражающего тыльного контакта позволяет уменьшить температурный коэффициент фототока до  $0.14\%/K$ . Необходимо отметить, что для солнечного спектра АМ-1.5, как установлено расчетом,  $TK$  уменьшается до  $0.05\%/K$ .

Приведенные результаты показывают, что явление интерференции в значительной степени обуславливает температурное поведение фотопреобразователей на основе  $a\text{-Si} : \text{H}$  с зеркально отражающим тыльным контактом и может быть использовано для изготовления термостабильных элементов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Carlson D. E. Solar cells // *Semiconduct. a. Semimet. V. 21D* / Ed. by J. Pankove. P. 7—37.
- [2] Лей Л. Фотозмиссия и оптические свойства // *Физика гидрогенизированного аморфного кремния* / Под ред. Дж. Джоунупулоса и Дж. Люковски. М., 1988. В. 2. С. 86—216.
- [3] Reichman J. // *Appl. Phys. Lett.* 1981. V. 38. N 4. P. 251—253.
- [4] Манакон С. М., Сулейменов Б. С., Таурбаев Т. И., Дрюков В. Г. // *ФТП.* 1991. Т. 25. В. 9. С. 1601—1606.
- [5] Wronski C. R., Abeles B., Gody G. D., Morel D. L., Tiedje T. // *Proc. IV IEEE Photovolt. Spec. Conf.* 1980. P. 1057—1061.
- [6] Коротков В. П., Омаров М. А., Стамкулов А. А., Таурбаев Т. И., Хренов Л. Л. // *Оптико-механическая промышленность.* 1985. № 9. С. 49—51.
- [7] Nakamura T., Kiyohashi K., Suzuki H. // *Sol. St. Electron.* 1979. V. 22. N 7. P. 639—644.

Казахский государственный университет  
им. Аль-Фараби  
Алма-Ата

Получено 17.06.1991  
Принято к печати 21.01.1992

*ФТП, том 26, вып. 6, 1992*

## ЭФФЕКТ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ В ПОЛУИЗОЛИРУЮЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ GaAs И InP ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ АРГОНА

Павлов П. В., Демидов Е. С., Карзанов В. В.

Известно [1], что полуизолирующие полупроводниковые материалы  $A^{III}B^V$  получают путем легирования их глубокими примесями. В случае арсенида галлия обычно используют для этого хром, а в случае фосфида индия — железо. Важной технологической проблемой здесь является получение слитков с однородным распределением электрофизических параметров (проводимость, концентрация