

Поляризационная фоточувствительность гетеропереходов  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$ 

© Ю.А. Николаев, В.Ю. Рудь\*, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия\*Санкт-Петербургский государственный технический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 18 января 2000 г. Принята к печати 20 января 2000 г.)

Выполнены исследования фоточувствительности гетеропереходов, полученных осаждением тонких аморфных пленок на подложках кристаллического кремния. Обнаружена поляризационная фоточувствительность гетеропереходов, возникающая при наклонном падении линейно поляризованного излучения на их приемную плоскость. Установлено, что наведенный фотоэффект гетеропереходов возрастает с увеличением угла падения  $\theta$  по квадратичному закону и при  $\theta = 80^\circ$  достигает 60%. Сделан вывод о том, что полученные гетеропереходы могут найти применение в качестве широкополосных фотосенсоров линейно поляризованного излучения.

Главной проблемой, сдерживающей массовое применение фотовольтаической энергии, остается высокая стоимость преобразователей поступающего на землю излучения Солнца [1]. Определенные надежды в решении данной проблемы связываются, в частности, с развитием технологий тонкопленочного аморфного и поликристаллического кремния, а также создания высокоэффективных солнечных элементов на их основе [2–5]. В этих работах изучен процесс фотопреобразования естественного излучения в гетеропереходах между аморфной ( $a\text{-Si:H}$ ) и кристаллической ( $c\text{-Si}$ ) модификациями кремния с максимальной эффективностью до 18%. Настоящее сообщение посвящено первым исследованиям поляризационной фоточувствительности гетеропереходов  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  и продемонстрирована возможность их применения в новой для основного полупроводникового материала электроники области.

Гетеропереходы создавались нанесением пленок  $a\text{-Si:H}$  на полированную поверхность ориентированных в плоскости (100) и однородно легированных бором пластин кремния  $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho \cong 7.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  при  $T = 300 \text{ К}$ . Пленки  $a\text{-Si:H}$  толщиной до 1 мкм осаждались методом высокочастотного (ВЧ) тлеющего разряда при температурах  $c\text{-Si}$  подложек  $230^\circ\text{C}$ . Пленки  $a\text{-Si:H}$  имели  $n$ -тип проводимости и  $\rho \cong 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  при  $T = 300 \text{ К}$ . Средние размеры подложек  $c\text{-Si}$  были  $\sim 10 \times 10 \times 0.3 \text{ мм}$ . Наружная поверхность пленки  $a\text{-Si:H}$  была зеркальной, а сами пленки обнаружили высокую адгезию в отношении поверхности  $c\text{-Si}$ .

Типичная стационарная вольт-амперная характеристика одного из полученных гетеропереходов (ГП) приведена на рис. 1. Гетеропереход между кристаллической и аморфной фазами кремния, как следует из рис. 1, обладает ярко выраженным выпрямлением. Пропускное направление всегда отвечает положительному знаку напряжения на подложке  $c\text{-Si}$ . Выше напряжений прямого смещения  $U > 3 \text{ В}$  стационарная вольт-амперная харак-

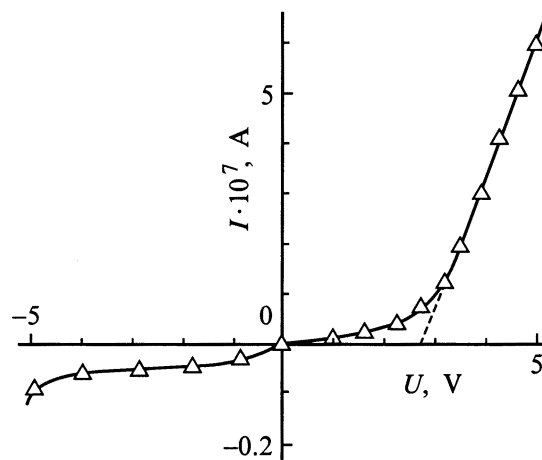
теристика подчиняется соотношению

$$I = \frac{U - U_0}{R_0}, \quad (1)$$

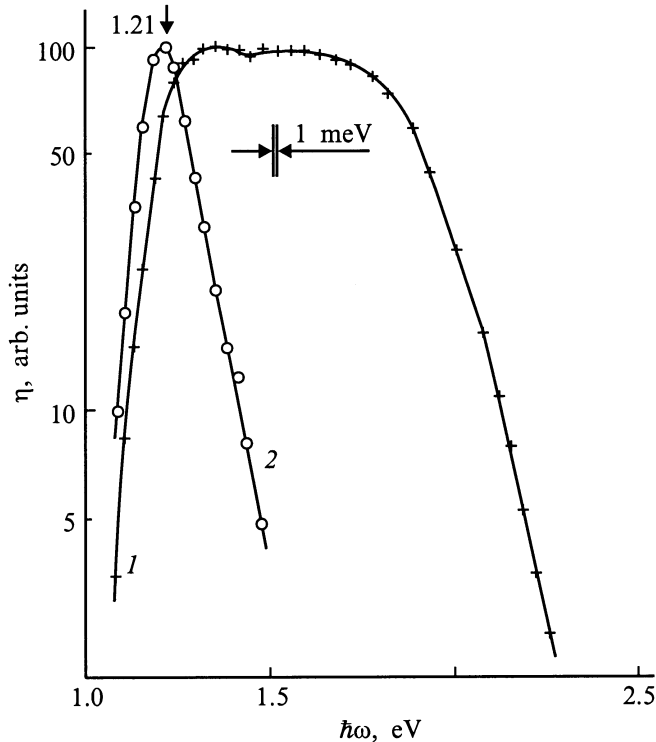
где остаточное сопротивление  $R_0 \cong (0.3 \div 10) \cdot 10^6 \text{ Ом}$  для разных структур при напряжениях отсечки  $U_0 \cong 2 \div 2.8 \text{ В}$ . Обратный ток следует степенному закону  $I \sim U^{0.8}$ . При смещениях  $U \cong 5 \text{ В}$  обратный ток в изученных ГП находился на уровне  $\sim 10^{-7} \text{ А}$ .

Фотовольтаический эффект в полученных ГП доминирует при их освещении со стороны широкозонной пленки  $a\text{-Si:H}$ , которая независимо от места попадания светового зонда на поверхность структур всегда заряжается отрицательно, что соответствует направлению выпрямления. Максимальная вольтовая фоточувствительность полученных ГП достигает  $\sim 60 \text{ В/Вт}$ , тогда как токовая  $\sim 5 \text{ мкА/Вт}$  при  $T = 300 \text{ К}$ .

Типичные спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования  $\eta$  для



**Рис. 1.** Стационарная вольт-амперная характеристика гетероперехода  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  при  $T = 300 \text{ К}$  (Образец № 2, прямое направление отвечает отрицательной полярности внешнего смещения на пленке  $a\text{-Si:H}$ ).



**Рис. 2.** Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования гетероперехода  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  при  $T = 300\text{ K}$  (Образец № 5, 1 — освещение естественным излучением со стороны подложки  $a\text{-Si:H}$ , 2 — освещение со стороны подложки  $c\text{-Si}$ ).

одного из ГП приведены на рис. 2. При освещении ГП со стороны  $a\text{-Si:H}$  спектры фоточувствительности, как правило, широкополосные. Максимальная фоточувствительность реализуется в диапазоне энергий фотонов  $1.3 \div 1.6\text{ эВ}$ , а полная ширина спектральной полосы  $\eta$  на ее полувысоте  $\delta_{1/2} \cong 700 \div 720\text{ мэВ}$ . Длинноволновый край фоточувствительности таких ГП не зависит от геометрии фоторегистрации (рис. 2, кривые 1 и 2) и определяется межзонными оптическими переходами в кристаллическом кремнии. В соответствии с характером межзонных переходов в  $c\text{-Si}$  длинноволновый край  $\eta$  спрямляется в координатах  $(\eta\hbar\omega)^{1/2} - \hbar\omega$ , и экстраполяция этой зависимости к нулевой энергии ( $\hbar\omega \rightarrow 0$ ) дает значение (рис. 3), согласующееся с шириной запрещенной зоны  $c\text{-Si}$  [6].

Освещение ГП со стороны  $c\text{-Si}$  вызывает сужение спектральной полосы фоточувствительности (рис. 2, кривая 2), так что  $\delta_{1/2} \cong 160\text{ мэВ}$  и падает с увеличением толщины подложки из-за увеличения влияния оптического поглощения в ней. Аналогичная причина коротковолнового спада  $\eta$  и в случае освещения ГП со стороны широкозонной компоненты. В этом случае снижение фоточувствительности ГП при  $\hbar\omega > 1.7\text{ эВ}$  определяется оптическими потерями в пленке  $a\text{-Si:H}$ . В целом широкополосный характер фоточувствительности ГП  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  при освещении со стороны широко-

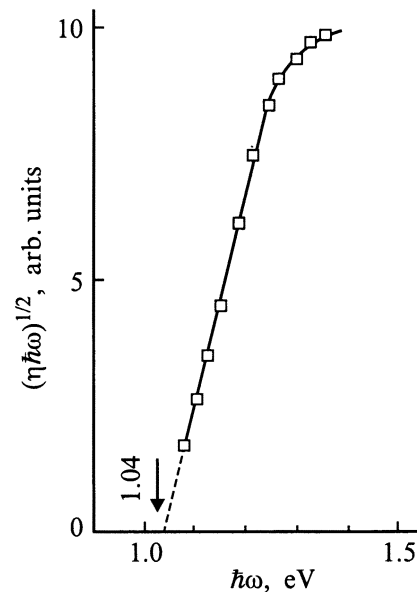
зонной компоненты демонстрирует достижение эффекта окна для падающего излучения, что указывает на получение достаточно совершенной в отношении процессов рекомбинации гетерограницы между кристаллической и аморфной модификациями кремния.

Исследования полученных ГП при линейно поляризованном излучении (ЛПИ) в условиях освещения вдоль нормали к фотоприемной плоскости показали, что поляризационная фоточувствительность в них не наблюдается и, следовательно, естественный фотоэффект отсутствует [7]. Это обстоятельство находится в соответствии с изотропным характером оптических процессов в аморфном и кристаллическом кремнии.

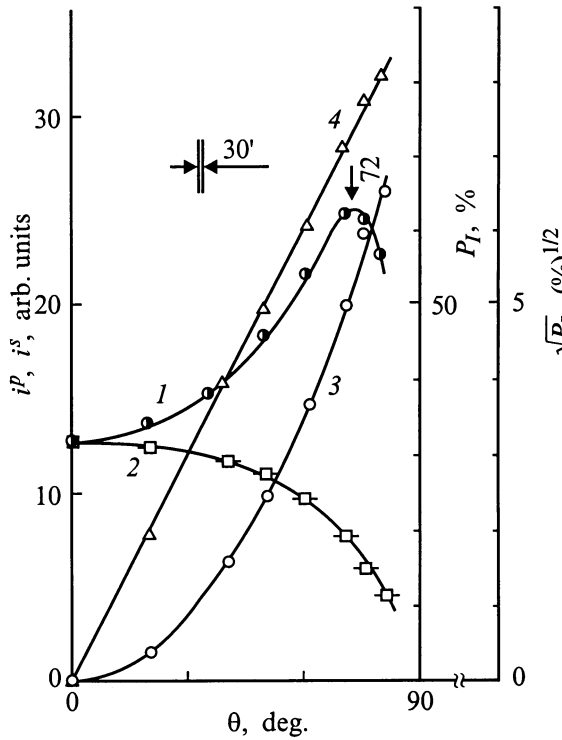
Как только угол падения ЛПИ  $\theta$  на приемную плоскость ГП становится отличным от  $0^\circ$ , фототок короткого замыкания  $i$  начинает зависеть от азимутального угла  $\varphi$  между вектором электрического поля  $\mathbf{E}$  световой волны и плоскостью падения (ПП) излучения в соответствии с законом

$$i_\varphi = i^p \cos^2 \varphi + i^s \sin^2 \varphi, \quad (2)$$

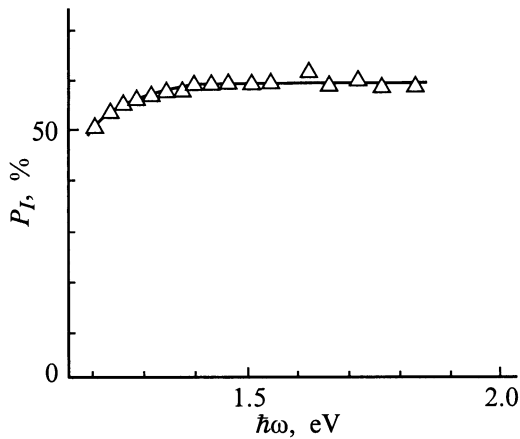
где  $i^p$  и  $i^s$  — фототоки при  $\mathbf{E} \parallel \text{ПП}$  и  $\mathbf{E} \perp \text{ПП}$  соответственно. Эти зависимости определяются амплитудными коэффициентами прохождения световой волны разных поляризаций границы воздух- $a\text{-Si:H}$  в соответствии с соотношениями Френеля [8]. На рис. 4 (кривые 1, 2) приведены типичные зависимости фототоков  $i^p$  и  $i^s$  от угла падения на приемную плоскость  $a\text{-Si:H}$  одного из ГП при фиксированной энергии падающих фотонов, попадающей в область фоточувствительности ГП. Характер угловых зависимостей фототоков сохраняется во всей области фоточувствительности ГП и в соответствии с критериями [9] характеризует полученные на кристаллическом кремнии пленки  $a\text{-Si:H}$  как достаточно совершенные.



**Рис. 3.** Зависимость  $(\eta\hbar\omega)^{1/2} - \hbar\omega$  для гетероперехода  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  при  $T = 300\text{ K}$  (Образец № 5).



**Рис. 4.** Зависимость фототоков короткого замыкания ( $I - i^p$ ,  $2 - i^s$ ) и коэффициента наведенного фотоплетохроизма ( $3 - P_I = f(\theta)$ ,  $4 - \sqrt{P_I} = f(\theta)$ ) гетероперехода  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  от угла падения ЛПИ со стороны пленки  $a\text{-Si:H}$  при  $T = 300\text{ K}$ .



**Рис. 5.** Спектральная зависимость коэффициента наведенного фотоплетохроизма гетероперехода  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  при  $T = 300\text{ K}$  (Образец № 5, освещение со стороны подложки  $a\text{-Si:H}$ ,  $\theta = 75^\circ$ ).

Коэффициент наведенного фотоплетохроизма в исследованных ГП при освещении со стороны  $a\text{-Si:H}$  во всей области их фоточувствительности плавно увеличивается с ростом угла падения по квадратичному закону  $\sqrt{P_I} \sim \theta$  (рис. 4, кривые 3, 4), что соответствует данным [9]. Важно отметить, что угловые зависимости  $P_I$  во всей области фоточувствительности ГП всегда "выходят" из

нуля. Это свойственно системам с изотропным характером фоточувствительности и поэтому основания считать, что наблюдаемая поляризационная фоточувствительность всецело связана только с анизотропией оптических процессов на границе воздух/ $a\text{-Si:H}$ . Экспериментальные зависимости  $P_I(\theta)$  (рис. 4, кривая 3) также показывают, что за счет увеличения угла падения ЛПИ от 0 до  $80^\circ$  коэффициент наведенного фотоплетохроизма может плавно регулировать от 0 до 65%. Близкая перестроечная кривая  $P_I(\theta)$  получается и при освещении ГП со стороны  $c\text{-Si}$ . Поэтому оценка показателя преломления на основании экспериментальных величин  $P_I$  для случаев освещения ГП со стороны поверхностей аморфной и кристаллической компонент дает практически одинаковые значения  $n \approx 3.4$ , которые согласуются с известными результатами [6].

На рис. 5 приведена типичная спектральная зависимость коэффициента наведенного фотоплетохроизма для одного из ГП  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  в условиях освещения со стороны аморфной пленки, когда фоточувствительность этих ГП максимальная и сохраняется на высоком уровне в диапазоне энергий между ширинами запрещенных зон контактирующих фаз. Из рис. 5 видно, что при фиксированном угле падения коэффициент наведенного фотоплетохроизма в области максимальной фоточувствительности таких ГП также сохраняется на высоком уровне и слабо зависит от длины волны. Эта экспериментальная зависимость  $P_I(\hbar\omega)$  оказывается близкой к данным для  $p\text{-}n$ -структуры на кристаллическом кремнии [9], что также указывает на близость значений показателей преломления в подложках кристаллического кремния и выращенных на них пленках аморфного кремния.

Таким образом, впервые выполненные поляризационные исследования фоточувствительности гетероконтакта аморфного и кристаллического кремния в линейно поляризованном излучении показали, что гетеропереходы  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  обнаруживают наведенную поляризационную фоточувствительность и могут найти применение в новой для них области, а именно в качестве широкодиапазонных фотосенсоров ЛПИ, тогда как поляризационная спектроскопия фотоактивного поглощения может использоваться при экспрессной диагностике качества пленок  $a\text{-Si:H}$  и корректировке условий их роста.

Работа частично поддержана финансированием по гранту INTAS-97-1910.

## Список литературы

- [1] *Polycrystalline Semiconductors V-Bulk Materials. Thin Films and Devices*, ed. by J.H. Werner, H.P. Strunk, H.W. Schock (Scitec. Publ. Ltd., Uetikon-Zuerich, 1999).
- [2] K.O. Kuda, H. Okamoto, Y. Hamakawa. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **22**, L605 (1993).
- [3] W. Wang, K. Liao. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **70**, 399 (1986).
- [4] R.De Rosa, M.L. Grill, G. Sasikala, M. Tucci, F. Roca. *Sol. St. Phenomena*, **67-68**, 563 (1999).

- [5] R.M. Hausner, N. Jensen, R.B. Bergman, U. Rau, J.H. Werner. Sol. St. Phenomena, **67–68**, 551 (1999).
- [6] *Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник* (М., Наука, 1979).
- [7] Ф.П. Кесаманлы, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **30**, 1921 (1996).
- [8] Г.С. Ландсберг. *Оптика* (М., Физматгиз, 1976).
- [9] Ф.П. Кесаманлы, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **33**, 513 (1999).

Редактор В.В. Чалдышев

## Polarization photosensitivity of $a\text{-Si:H/c-Si}$ heterojunctions

Yu.A. Nikolaev, V.Yu. Rud'\*, Yu.V. Rud', E.I. Terukov

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

\*St. Petersburg State Technical University,  
195251 St. Petersburg, Russia

**Abstract** A study has been made of the heterojunction photosensitivity of thin amorphous layers deposited on a crystalline substrate. Polarization photosensitivity of  $a\text{-Si:H/c-Si}$  heterojunctions under incident linear-polarization radiation upon the recipient plane was found. It has been observed that the photopleochroism of heterojunctions increased with the incidence angle  $\theta$  to the quadratic law and was equal to 60% at  $\theta = 80^\circ$ . The conclusion is made that the heterojunctions obtained can find their applications as wide band photosensors of the linear-polarization radiation.