

## Фоточувствительность гетеропереходов $a\text{-C:H}/c\text{-Si}$

© В.Г. Барышников\*, Ю.А. Николаев<sup>†</sup>, В.Ю. Рудь<sup>†</sup>, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* Институт физики Дагестанского научного центра Российской академии наук,  
367030 Махачкала, Россия

<sup>†</sup> Санкт-Петербургский государственный технический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 19 марта 2001 г. Принята к печати 3 апреля 2001 г.)

Методом тлеющего разряда в газовой смеси  $\text{CH}_4 + \text{Ar}$  на пластинах  $c\text{-Si}$  получены слои  $a\text{-C:H}$ . Исследованы электрические и фотоэлектрические свойства гетеропереходов  $a\text{-C:H}/c\text{-Si}$ . В полученных гетеропереходах обнаружено выпрямление и широкополосный фотовольтаический эффект. Показано, что поляризационная фоточувствительность в этих структурах возникает в условиях наклонного падения линейно поляризованного излучения со стороны слоев  $a\text{-C:H}$ , а обнаруженные осцилляции в спектре коэффициента наведенного фотоплетохроизма обусловлены интерференцией излучения в этих слоях.

Исследования возможностей применений углерода в виде аморфных слоев  $a\text{-C:H}$  в фотопреобразователях на основе кремния стремительно расширяются [1–4]. Центральной проблемой в этой весьма перспективной системе считается выбор технологии, обеспечивающей достаточно эффективное легирование слоев углерода [3,5]. В данной работе представлены результаты первых исследований фотоэлектрических свойств в естественном и линейно поляризованном излучении (ЛПИ) гетеропереходов (ГП), созданных нанесением тонких слоев аморфного углерода на поверхность монокристаллического кремния при вариации технологических параметров процесса.

В качестве подложек для осаждения углерода применялись ориентированные в плоскости (100) монокристаллические пластины кремния  $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\sim 20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  при температуре  $T = 300 \text{ К}$ . Для осаждения слоев углерода из газовой смеси 12%  $\text{CH}_4$  с аргоном применялся метод тлеющего разряда в реакторной камере емкостного типа с квазизамкнутым объемом с диаметром электродов 110 мм. Температура подложки  $T_s$  в процессе осаждения поддерживалась на уровне комнатной или  $100^\circ\text{C}$ , а приложенная высокочастотная (ВЧ) мощность  $P$  (частота 13.5 MHz) соответствовала приведенным в таблице данным при временах осаждения  $\sim 1 \text{ ч}$ . На поверхности пластин кремния образовывались однородно окрашенные в темно-лиловый цвет слои, обнаружившие высокую адгезию по отношению к материалу подложки. Геометрическая толщина пленок была  $\sim 100 \text{ нм}$ .

Исследования стационарных вольт-амперных характеристик (ВАХ) таких ГП показали, что использованный метод нанесения слоев  $a\text{-C:H}$  обеспечивает воспроизводимое получение выпрямляющих структур. На рис. 1 в качестве примера приведена стационарная ВАХ одного из исследованных ГП. Пропускное направление, как правило, реализуется во всех структурах при отрицательной полярности внешнего смещения на слоях  $a\text{-C:H}$ . При

напряжениях выше напряжения отсечки  $U_0$  прямые ветви стационарных ВАХ подчиняются соотношению

$$I = (U - U_0)/R_r,$$

причем величины остаточного сопротивления  $R_r$  и напряжения  $U_0$  проявили зависимость от параметров технологического процесса (см. таблицу). Достаточно широкий диапазон изменения этих величин в зависимости от подаваемой мощности  $P$  и температуры подложки  $T_s$  в последующем может послужить основанием к созданию основ управления электрическими свойствами этого типа ГП.

При освещении ГП возникает фотовольтаический эффект, причем его знак не зависит от места локализации светового зонда (диаметр  $\sim 0.5 \text{ мм}$ ) на поверхности

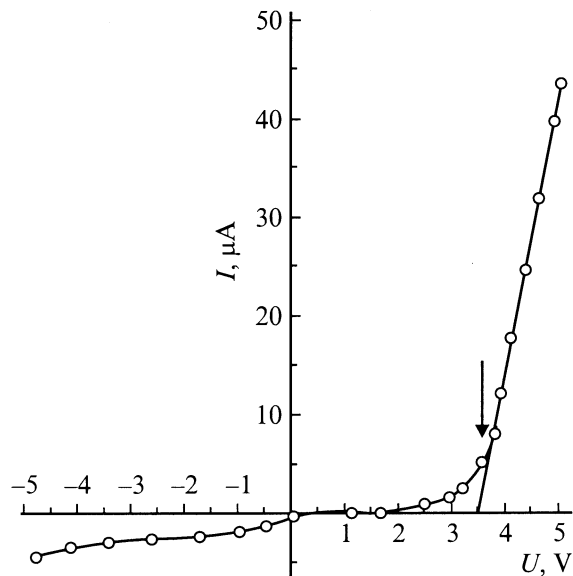


Рис. 1. Стационарная вольт-амперная характеристика гетероперехода  $a\text{-C:H}/c\text{-Si}$  при  $T = 300 \text{ К}$ . Образец 1, пропускное направление отвечает положительному потенциалу на  $c\text{-Si}$ .

<sup>†</sup> E-mail: yu.nikolaev@pop.ioffe.rssi.ru

Фотоэлектрические характеристики гетеропереходов  $a\text{-C:H}/c\text{-Si}$

№ образца	Условия нанесения $a\text{-C:H}$		$U_0$ , В	$R_r$ , $10^5$ Ом	$S_U^m$ , В/Вт	$S_I^m$ , мкА/Вт
	$P$ , Вт	$T_s$ , К				
1	15	300	3.5	1.2	43	27
2	15	400	1.9	3.1	80	—
3	30	300	4.0	5.3	150	—
4	30	400	2.5	6.0	26	—

Примечание. Температура измерения  $T = 300$  К, освещение со стороны слоя аморфного углерода.

структур и слои всегда заряжаются отрицательно относительно подложки, что соответствует полярности выпрямления. Фоточувствительность всех ГП оказывается наибольшей при их освещении со стороны слоев  $a\text{-C:H}$  и приведена в таблице именно в этой геометрии регистрации. Видно, что величина максимальной вольтовой фоточувствительности  $S_U^m$  зависит от условий нанесения слоев углерода, а максимальная токовая фоточувствительность достигает значений  $S_I^m \approx 27$  мкА/Вт и в основном определяется их сопротивлением.

Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности  $\eta$  полученных ГП при их освещении неполяризованным излучением представлены на рис. 2. Видно, что при освещении ГП как со стороны слоев  $a\text{-C:H}$ , так и со стороны толстых подложек монокристаллического кремния энергетическое положение и форма длинноволновой границы  $\eta$  определяются межзонным поглощением в кристаллическом кремнии. В области фундаментального поглощения  $c\text{-Si}$  с ростом коэффициента оптического поглощения обнаруживается явная зависимость  $\eta(\hbar\omega)$  от геометрии освещения ГП. Так, при освещении со стороны подложки (рис. 2, кривая  $I'$ ) при  $\hbar\omega > 1.2$  эВ наблюдается резкий спад фоточувствительности структур, обусловленный удалением зоны поглощения излучения от активной области структур, тогда как с переходом к освещению ГП со стороны слоев  $a\text{-C:H}$  спектры фоточувствительности становятся широкополосными (рис. 2, кривая  $I-4$ ) и знак фототока сохраняется постоянным во всем спектральном диапазоне фоточувствительности. Поэтому можно считать, что гетероконтакт слоя аморфного углерода и кристаллического кремния обеспечивает создание эффективного энергетического барьера, а обнаруженные интерференционные особенности в спектрах  $\eta(\hbar\omega)$  ряда ГП (рис. 2, кривые  $I$  и  $3$ ) указывают на достаточно высокое оптическое качество аморфных слоев  $a\text{-C:H}$ .

Следует отметить, что с увеличением ВЧ мощности при получении слоев на длинноволновом крае  $\eta(\hbar\omega)$  возникают четкие пики с максимумом на энергии  $\hbar\omega^m \approx 1.13$  эВ (рис. 2, кривые  $3$  и  $4$ ), тогда как при более низких приложенных мощностях в спектрах  $\eta(\hbar\omega)$  имеется только перегиб вблизи этой энергии (рис. 2, кривые  $I$  и  $2$ ). Можно только допустить, что данная особенность обусловлена появлением в таких слоях аморф-

ного углерода подслоев или включений фазы углерода с шириной запрещенной зоны  $E_g \approx 1$  эВ [4], тогда как основной объем слоев  $a\text{-C:H}$  состоит из широкозонной фазы, что и обеспечивает в конечном счете широкополосный характер фоточувствительности ГП, полученных методом тлеющего разряда в газовой смеси  $\text{CH}_4 + \text{Ar}$ . Область максимальной фоточувствительности полученных ГП хорошо согласуется со спектром излучения Солнца, что свидетельствует о перспективах их применения в разработках высокоэффективных солнечных элементов.

Исследования фоточувствительности ГП  $a\text{-C:H}/c\text{-Si}$  в линейно поляризованном излучении при их освещении вдоль нормали к плоскости  $a\text{-C:H}$  не обнаружили какой-либо зависимости фотоответа от пространственной ориентации вектора электрического поля  $\mathbf{E}$  световой волны относительно исследованных структур, что отражает изотропный характер фотоактивного поглощения в обоих гетерокомпонентах. Поляризационная фоточувствительность ГП возникает только в условиях наклонного падения ЛПИ. Угловые зависимости фототоков короткого замыкания в обеих поляризациях  $i^p$  и  $i^s$  в таких ГП оказываются подобными и характеризуются их возрастанием по мере увеличения угла падения  $\theta$  с

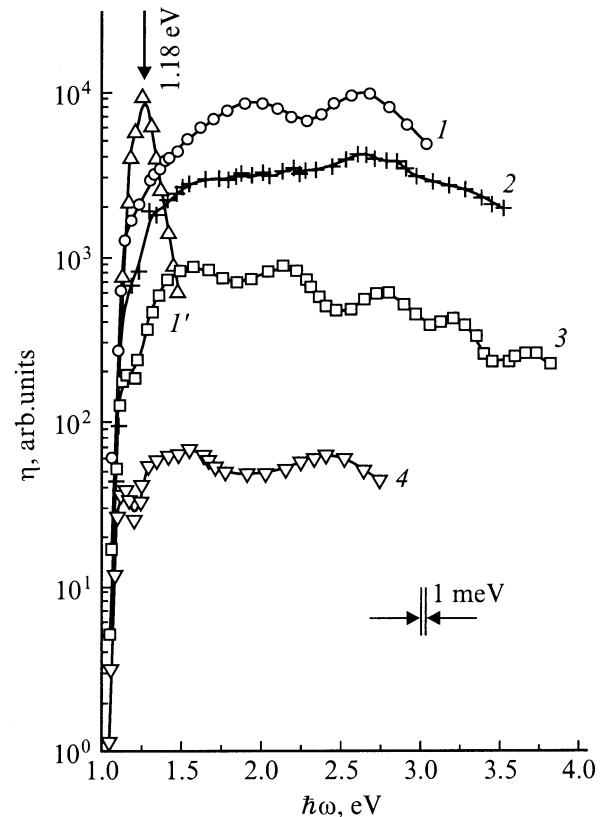
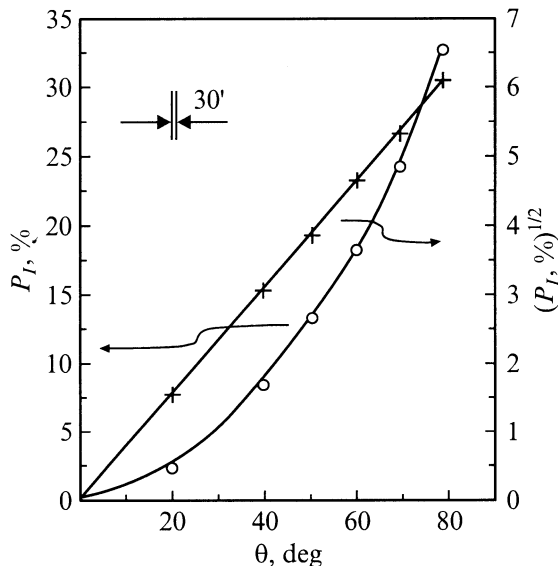
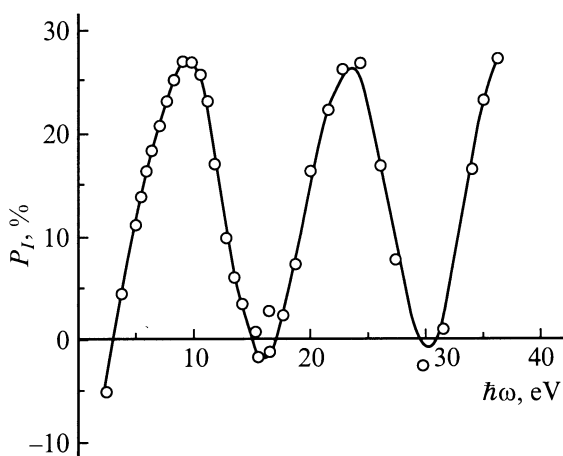


Рис. 2. Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности гетеропереходов  $a\text{-C:H}/c\text{-Si}$  в неполяризованном свете при  $T = 300$  К. ( $I-4$ ) — освещение со стороны слоя  $a\text{-C:H}$ ,  $I'$  — освещение со стороны подложки  $c\text{-Si}$  толщиной 0.3 мм. Номера кривых  $I-4$  соответствуют номерам образцов (таблица).  $I'$  — образец 1.



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента наведенного фотоплекроизма от угла падения линейно поляризованного излучения на поверхность  $a\text{-C:H}$  гетероперехода  $a\text{-C:H}/c\text{-Si}$  при  $T = 300$  К. Образец 3,  $\hbar\omega = 2.2$  эВ.



**Рис. 4.** Спектральная зависимость коэффициента наведенного фотоплекроизма гетероперехода  $a\text{-C:H}/c\text{-Si}$  при  $T = 300$  К. Образец 3,  $\theta = 70^\circ$ .

образованием максимумов, что, согласно [6,7], связано с проявлением интерференции и свидетельствует о высоком совершенстве слоев  $a\text{-C:H}$ .

На рис. 3 приведена типичная для всех исследованных ГП  $a\text{-C:H}/c\text{-Si}$  угловая зависимость коэффициента наведенного фотоплекроизма  $P_I$ , которая во всей области фоточувствительности описывается параболическим законом  $P_I^{1/2} \sim \theta$ , что соответствует теоретическим представлениям [8]. Спектральные зависимости коэффициента наведенного фотоплекроизма в таких ГП (рис. 4) обнаружили яркие осцилляции, которые, согласно [7–9], обусловлены интерференцией падающего излучения в

слоях аморфного углерода. Из спектров  $P_I(\hbar\omega)$  хорошо видно, что полученные ГП могут быть использованы в качестве селективных фотоанализаторов ЛПИ в окрестности максимумов  $P_I(\hbar\omega)$ , а условие максимального просветления  $P_I = 0$  [8] выполняется в окрестности минимумов кривых  $P_I(\hbar\omega)$ .

Таким образом, созданные на основе тонких слоев аморфного углерода и кристаллов кремния гетеропереходы обнаруживают широкополосный фотовольтаический эффект, а наклонное падение ЛПИ обеспечивает контролируемый условиями нанесения слоев  $a\text{-C:H}$  и углом падения наведенный фотоплекроизм, который может найти применение в диагностике таких структур и разработках поляриметрических фотосенсоров ЛПИ.

## Список литературы

- [1] H.N. Konofaos, C.B. Tomas. *J. Appl. Phys.*, **81**, 6238 (1997).
- [2] S. Birkle, J. Kammermaier, G.P. Rutmayer. US-Patent 5206534 (1993).
- [3] K.M. Krishna, T. Soga, T. Jimbo, M. Umeno. *Carbon*, **37**, 531 (1999).
- [4] K.M. Krishna, Y. Nukaya, T. Soga, T. Jimbo, M. Umei. *Solar Energy Mat. Solar Cells*, **65**, 163 (2001).
- [5] K.L. Narayanan, M. Yamaguchi. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2106 (1999).
- [6] В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. *ФТП*, **31**, 245 (1997).
- [7] В.М. Ботнарюк, А.В. Коваль, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, А.В. Симашкевич, Д.А. Щербак. *ФТП*, **31**, 800 (1997).
- [8] Ф.П. Кесаманлы, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. *ФТП*, **33**, 513 (1999).
- [9] V.Yu. Rud', Yu.V. Rud', H.W. Schock. *Sol. St. Phenomena*, **67–68**, 421 (1999).

Редактор Л.В. Шаронова

## Photosensitivity of $a\text{-C:H}/c\text{-Si}$ heterojunctions

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

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

\* Institute of Physics, Dagestan Science Centre,  
Russian Academy of Sciences  
367030 Makhachkala, Russia

† St.Petersburg State Technical University,  
195251 St.Petersburg, Russia

**Abstract**  $a\text{-C:H}$  layers were deposited on  $c\text{-Si}$  substrates by glow discharge decomposition of  $(\text{CH}_4 + \text{Ar})$  gas mixture. The electrical and photoelectrical properties of  $a\text{-C:H}/c\text{-Si}$  heterojunctions were studied. The rectification effect and wideband photovoltaic effect in these heterojunctions were observed. It was shown that the polarization photosensitivity of  $a\text{-C:H}/c\text{-Si}$  heterojunctions occurred under inclined linear-polarized radiation from  $a\text{-C:H}$  layer, while the oscillations observed in spectrum of the induced photochromism coefficient were conditioned by the radiation interference in those layers.