

## Фотоэлектрические свойства гетероконтакта пористого и монокристаллического кремния

© В.Ю. Рудь\*, Ю.В. Рудь

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

\* Санкт-Петербургский государственный технический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 15 апреля 1996 г. Принята к печати 24 апреля 1996 г.)

Экспериментально исследована поляризационная фоточувствительность гетероконтакта пористого и монокристаллического кремния. Максимум фоточувствительности  $\sim 1$  мА/Вт наблюдается в области  $1.2 \div 2.3$  эВ. Поляризационная фоточувствительность наблюдается при наклонном падении линейного поляризованного света на поверхность слоя пористого кремния. Коэффициент фотопоглощения этих гетероструктур контролировался углом падения излучения  $\theta$ , увеличивался  $\sim \theta^2$  и его максимальное значение достигало  $\sim 32\%$  при  $\theta \simeq 80^\circ$ . В фототоке и коэффициенте фотопоглощения этих структур наблюдаются осцилляции, обусловленные интерференцией естественного и линейно поляризованного излучения в слоях пористого кремния. Гетероструктуры, представляющие собой слои пористого кремния на монокристаллическом кремнии могут найти применение как фотопреобразователи естественного и линейно поляризованного света.

Понижение размерности в полупроводниках является одним из эффективных средств управления их фундаментальными параметрами [1,2]. В последнее время все большее внимание уделяется изучению видимого излучения из пористого кремния [1–5]. Данная работа посвящена поляризационным исследованиям фоточувствительности гетероконтакта между монокристаллическим кремнием и образующимся в процессе его анодного травления слоем пористого кремния.

1. Типичная стационарная вольт-амперная характеристика одной из гетероструктур (ГС), представляющих собой сформированные на ориентированных в плоскости (100) пластинах *p*-Si (КДБ-2) слои пористого кремния (ПК), показана на рис. 1. Для получения ГС применялся известный метод анодного травления пластин *p*-Si [1,2]. Толщина слоев ПК контролировалась временем травления и величиной анодного тока и изменялась от единиц до десятков микрометров. Пропускное направление в таких структурах отвечает отрицательной полярности внешнего смещения на слое ПК. При больших прямых смещениях ( $U > U_c$ ) ток ( $I$ ) зависит линейно от напряжения и следует выражению

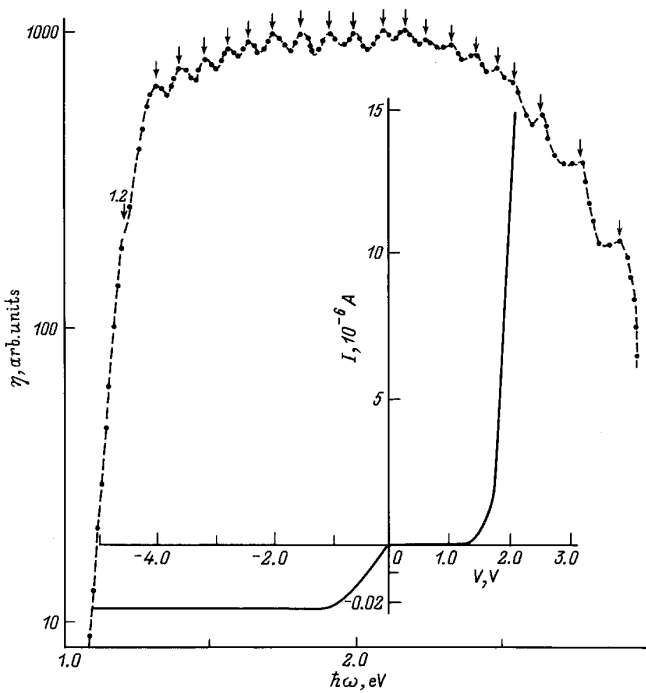
$$I = (U - U_c)/R,$$

где  $R$  — остаточное сопротивление. Для ГС с толщинами слоя ПК  $5 \div 10$  мкм обычно  $R = 2 \div 10$  МОм, а напряжение отсечки при этом составляет  $U_c = 1.5 \div 1.6$  В при  $T = 300$  К. При обратных смещениях до 25 В ток насыщается на уровне  $(2 \div 6) \cdot 10^{-8}$  А при  $T = 300$  К. Резкий пробой наступает при достижении обратных смещений  $30 \div 35$  В. С понижением толщины слоев ПК остаточное сопротивление уменьшается.

2. При освещении ГС возникает фотовольтаический эффект, который обусловлен разделением фо-

тогенерированных носителей заряда в электрическом поле, локализованном на границе слоев пористого и кристаллического кремния. Независимо от места расположения светового зонда (диаметр 1 мм) на поверхности ГС слой пористого кремния всегда заряжается отрицательно относительно подложки из *p*-Si. Обычно фоточувствительность больше при освещении этих ГС со стороны ПК и достигает по току  $S_i = 0.5 \div 1.0$  мА/Вт и по напряжению  $S_u = 20 \div 50$  В/Вт при  $T = 300$  К.

Типичная для полученных ГС спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования  $\eta$ , определяемой как отношение фототока короткого замыкания к числу падающих фотонов, приведена на рис. 1. При освещении таких структур вдоль нормали к поверхности со стороны слоя ПК наблюдается типичный для ГС эффект окна. При этом длинноволновая граница фоточувствительности следует экспоненциальному закону (рис. 1, кривая 2) и локализована в области энергий фотонов, отвечающих краевому поглощению в монокристаллическом кремнии. Если ГС освещать со стороны кристаллического кремния при толщинах подложек 0.4 мм и энергиях фотонов выше 1.15 эВ, то фототок падает практически до нуля, что обусловлено локализацией фото возбуждения на расстояниях, превышающих длину диффузионного смещения фотоэлектронов. Если освещение структур неполяризованным светом осуществляется со стороны слоя ПК (рис. 1), то имеет место широкополосный эффект, при толщинах слоев  $d = 10$  мкм фоточувствительность начинает заметно падать в области  $\hbar\omega \geq 2$  эВ. Последнее, по-видимому, обусловлено увеличением поглощения в слоях ПК в результате включения межзонных переходов. В диапазоне энергий между ширинами запрещенных зон кристаллического и пори-



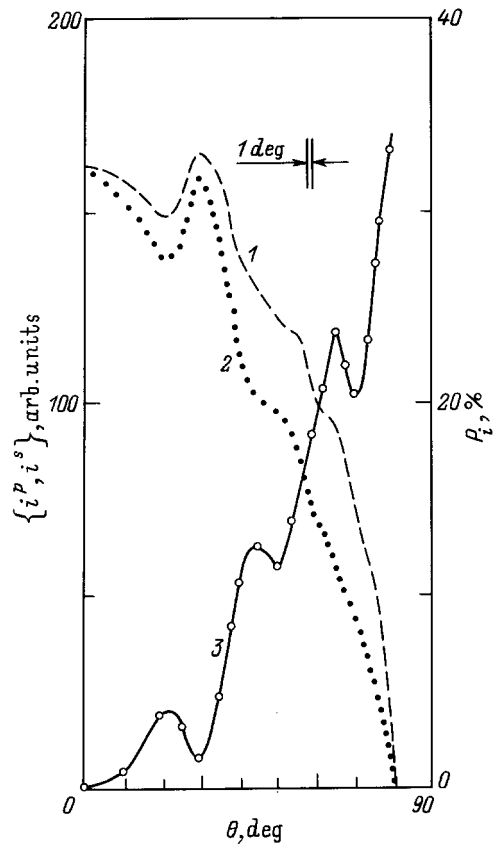
**Рис. 1.** Спектральная зависимость квантовой эффективности фотоответа гетероструктуры на основе пористого и кристаллического кремния. Образец 20 А,  $d = 5$  мкм,  $T = 300$  К, неполяризованное излучение, угол падения  $\theta = 0^\circ$ , спектральное разрешение не хуже 1 мэВ, освещение со стороны пористого кремния. На вставке — стационарная вольт-амперная характеристика.

стого кремния в спектрах фоточувствительности всех полученных структур со слоями ПК с зеркальной лицевой плоскостью четко проявляется серия практически эквидистантных пиков. В представленном примере (рис. 1) при освещении неполяризованным излучением число пиков достигает 20. Расстояние между пиками в среднем составляет  $\sim 90$  мэВ, что позволяет по известному значению показателя преломления для ПК [6] оценить толщину образующихся слоев:  $d \simeq 4 \div 5$  мкм. Полученная оценка толщины слоя из спектрального распределения фоточувствительности ГС находится в хорошем соответствии с результатами прямых микроскопических измерений. Вообще сам факт обнаружения структуры в спектрах фоточувствительности ГС, являющейся результатом интерференции падающего излучения в широкозонном веществе, позволяет сделать вывод о достаточно высокой однородности полученных слоев ПК.

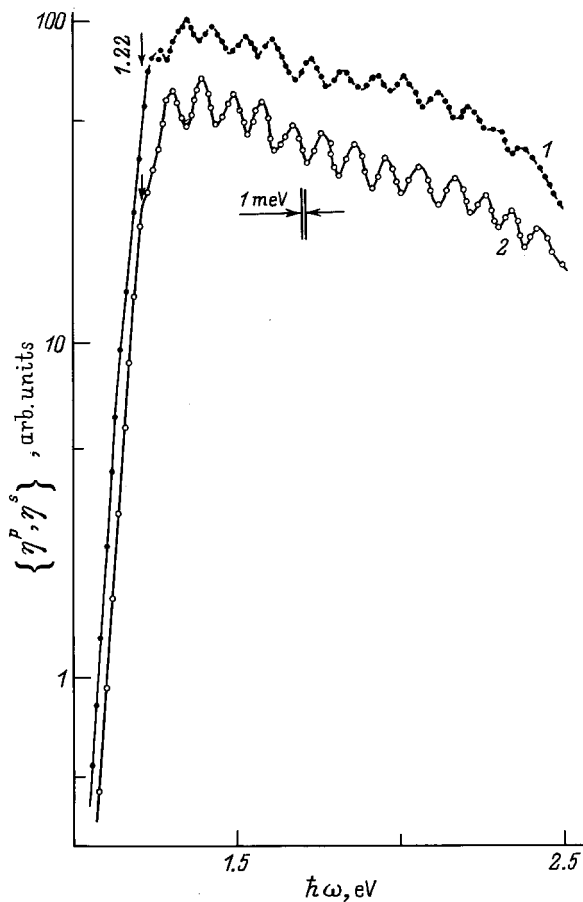
Следует отметить, что уже в ГС с толщинами слоев ПК  $\sim 1$  мкм коротковолновый спад в спектральных зависимостях  $\eta(\hbar\omega)$  практически отсутствует вплоть до 3 эВ.

3. При освещении полученных ГС линейно поляризованным излучением (ЛПИ) вдоль нормали к поверхности ПК во всей области фоточувствительности квантовая эффективность оказалась независимой от

положения электрического вектора световой волны **E** относительно главных кристаллографических осей кремниевой подложки, т. е. фотоактивное поглощение в обеих компонентах ГС изотропно. Следовательно, естественный фотополюхроизм в таких ГС отсутствует ( $P_N = 0$ ) [6]. Как только угол падения  $\theta$  становится отличным от нуля, фототок короткого замыкания при совмещении **E** с плоскостью падения (ПП) излучения  $i^p$  во всей области фоточувствительности начинает преобладать над фототоком  $i^s$ , соответствующим **E**  $\perp$  ПП. Причем, как видно из рис. 2, типичные зависимости фототоков  $i^p$  и  $i^s$  от угла падения для полученных ГС оказались отличающимися от ожидаемых из соотношений Френеля. Действительно, полученные зависимости  $i^p(\theta)$  и  $i^s(\theta)$  немонотонны и имеют, как минимум, три особенности в виде пиков и изломов (рис. 2, кривые 1 и 2). Такие зависимости были типичными для ГС с зеркальной приемной поверхностью. В исследованном диапазоне  $\theta$  поляризационные зависимости фототока при изменениях азимутального угла  $\varphi$  между **E** и ПП следуют периодическому закону, причем максимальный фототок отвечает **E**  $\parallel$  ПП, минимальный — **E**  $\perp$  ПП. На основании поляризационных измерений фототока при  $\theta = \text{const}$  и  $\hbar\omega = \text{const}$  вычислялся коэффициент наведенного фотополюхроизма  $P_i = (i^p - i^s)/(i^p + i^s)$ .



**Рис. 2.** Зависимости  $i^p$  (1),  $i^s$  (2) и коэффициента наведенного фотополюхроизма (3) от угла падения ЛПИ на поверхность пористого кремния. Образец 20А,  $T = 300$  К.



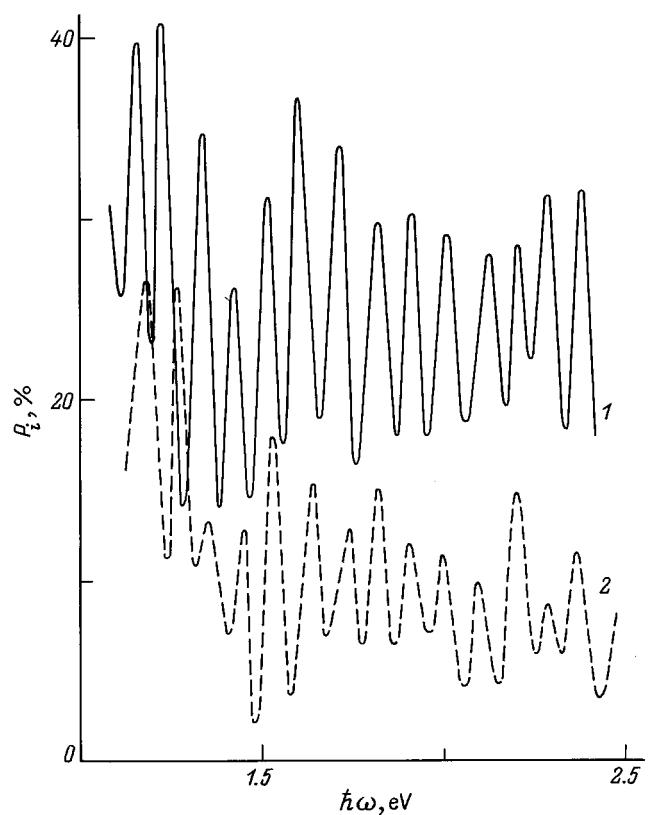
**Рис. 3.** Спектральные зависимости квантовой эффективности в *p*-поляризации ( $\eta^p$ ) (1) и в *s*-поляризации ( $\eta^s$ ) (2) гетероконтакта пористого и кристаллического кремния. Образец 20А,  $T = 300$  К,  $\theta = 75^\circ$ .

Типичная для изученных ГС угловая зависимость наведенного фотоплетохроизма приведена на рис. 2 (кривая 3). Главные ее закономерности состоят в том, что с ростом угла падения наведенный фотоплетохроизм  $P_i$  возрастает по близкому к квадратичному закону, что соответствует приведенному в [8] анализу. Однако в отличие от ожидаемого согласно [8], экспериментальные зависимости  $P_i(\theta)$  имеют при определенных значениях угла падения несколько осцилляций. Такая особенность ранее не наблюдалась (см. [7-9]) и может быть связана с влиянием интерференции ЛПИ в широкозонном слое. Действительно, число и угловое положение осцилляций  $P_i$  определяются параметрами слоев. Как видно из рис. 2, коэффициент наведенного фотоплетохроизма при  $\theta = 70^\circ$  достигает  $20 \div 25\%$  для разных ГС, что с учетом [8] позволяет определить для образованных в результате анодного травления слоев показатель преломления:  $n \simeq 1.7$ . Эта величина отличается от известных значений  $n$  для кристаллического кремния, что служит основанием для объяснения наблюдаемой при наклонном падении ЛПИ поляри-

зационной фоточувствительности ГС явлениями на границе воздух-поверхность ПК.

На рис. 3 приведены типичные для полученных структур спектральные зависимости фототоков  $i^p$  и  $i^s$ . Видно, что во всей спектральной области фото чувствительности  $i^p > i^s$ , причем, как и в случае неполяризованного излучения (рис. 1, кривая 2), в области максимальной фото чувствительности для обеих поляризаций четко проявляется система эквидистантных пиков в спектрах фототоков. При этом число пиков в лучших структурах при  $d = 5$  мкм достигает  $13 \div 14$ . Характерно, что глубина модуляции фототока оказалась более высокой для  $i^s$ . Важно отметить также и то обстоятельство, что по энергетическому положению максимуму  $i^p$  отвечает минимум  $i^s$  и наоборот.

Последняя закономерность приводит к тому, что в отличие от известных особенностей наведенного фотоплетохроизма в структурах, где интерференция не наблюдается, для которых величина  $P_i$  практически постоянна во всей области фото чувствительности [9,10], в гетероструктурах из пористого и кристаллического кремния  $P_i$  начинает сильно изменяться в зависимости от энергии фотонов (рис. 4). Из рис. 4



**Рис. 4.** Спектральные зависимости коэффициента наведенного фотоплетохроизма гетероконтакта пористого и кристаллического кремния. Образец 20А,  $T = 300$  К,  $\theta$ , град.: 1 — 75, 2 — 45; освещение со стороны пористого кремния.

также следует, что с уменьшением угла падения  $\theta$  осцилляции в спектральных зависимостях  $P_i(\hbar\omega)$  сохраняются, но при этом происходит понижение среднего значения наведенного фотоплеохроизма в соответствии с законом  $P_i \sim \theta^2$  (рис. 2, кривая 3).

Таким образом, представленные результаты показывают, что ГС на основе пористого и кристаллического кремния могут найти применение в качестве широкополосных фотовольтаических преобразователей естественного и линейно поляризованного излучения. Обнаруженная интерференция света в анодизированных слоях кремния указывает на их высокую однородность и возможности использования поляризационной фотоэлектрической спектроскопии для экспрессной диагностики таких слоев.

Авторы признательны А.А. Лебедеву за предоставление структур и проявленный интерес.

## Список литературы

- [1] L.T. Canham. Appl. Phys. Lett., **57**, 1046 (1990).
- [2] M.S. Brandt, H.D. Fuchs, M. Stutzmann. Sol. St. Commun., **81**, 307 (1992).
- [3] Y. Kanemitsu, H. Uto, Y. Masumoto, T. Matsumoto, T. Futagi, H. Mimura. Phys. Rev. B, **48**, 2827 (1993).
- [4] L. Brus. J. Phys. Chem., **98**, 3575 (1994).
- [5] E.V. Astrova, A.A. Lebedev, A.D. Remenyuk, Yu.V. Rud'. Japan. J. Appl. Phys., **34**, 251 (1995).
- [6] S.M. Prokes. Appl. Phys. Lett., **62**, 3224 (1993).
- [7] Ю.В. Рудь. Изв. вузов. Физика, вып. 8, 68 (1986).
- [8] G.A. Medvedkin, Yu.V. Rud'. Phys. St. Sol. (a), **67**, 333 (1981).
- [9] S.G. Konnikov, D. Melebaev, V.Yu. Rud', Yu.V. Rud', A. Berkeliev, M. Serginov, S. Tilevov. Japan. J. Appl. Phys., **32**, 515 (1993).
- [10] В.Ю. Рудь. Автореф. канд. дис. (С.-Пб., ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН, 1995) с. 17.

Редактор Л.В. Шаронова

## Photoelectrical properties of porous and single crystal silicon heterocontacts

V.Yu. Rud',\* Yu.V. Rud'

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

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

**Abstract** An experimental investigation was made of the polarization photosensitivity of porous and single crystal silicon heterocontacts. The maximum photosensitivity  $\simeq 1$  mA/W was observed at the photon energies 1.2–2.3 eV. A polarization photosensitivity was obtained when linearly polarized light was incident obliquely on the surface of porous silicon layers. The photopleochroism coefficient of these heterostructures was governed by the angle of incidence  $\theta$ . The

photopleochroism rose proportionally to  $\theta^2$  and its maximum was 32% at  $\theta \simeq 80^\circ$ . These heterostructures exhibited the oscillations of the photocurrent and photopleochroism coefficient in the spectral range of photosensitivity. These oscillations were specified by the interference of natural and linearly polarized radiation in porous silicon layers. Heterostructures incorporating porous silicon layers on single crystal substrates can find application as photoconvertors of natural and linearly polarized light.