

## Фоточувствительность гетерограницы пористый кремний–кремний

© Е.В. Астрова, А.А. Лебедев, А.Д. Ременюк, 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 26 марта 1996 г. Принята к печати 8 апреля 1996 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований фотоэлектрических свойств гетерограницы пористого и монокристаллического кремния. Получены выпрямляющие гетероструктуры с фоточувствительностью до 1 мА/Вт при 300 К в области спектра 1.2÷2.3 эВ. Обнаружены осцилляции фототока, указывающие на интерференцию излучения в слоях пористого кремния. Оценен показатель преломления пористого кремния. Исследована поляризационная зависимость фоточувствительности гетероструктуры.

Проблема исследования физических свойств пористого кремния стала актуальной в связи с обнаруженной возможностью кардинальной трансформации фундаментальных параметров главного материала полупроводниковой электроники — кремния путем относительно простого воздействия на него с помощью анодного травления [1–5]. В данной работе для изучения пористого кремния впервые привлекается поляризационная спектроскопия фотоактивного поглощения [6] в гетероструктурах, представляющих собой контакт пористого и монокристаллического кремния.

### Эксперимент

Исследованные образцы представляли собой зеркальные слои пористого кремния (ПК) на полированной подложке из кремния *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 2 Ом·см и ориентацией (100), изготовленного по обычной технологии [2]. Толщина слоя ПК *d* контролировалась режимом травления, измерялась под микроскопом на вытравленном в растворе КОН участке и составляла от 1 до 10 мкм для разных образцов. Токоподводы присоединялись к слою ПК и к кремниевой пластине с помощью кратковременного сплавления индия.

Измерение фоточувствительности осуществлялось при 300 К и воздействии со стороны слоя ПК как естественным, так и поляризованным светом. Использовались вольфрамовая лампа и монохроматор SPM-2 с кварцевой призмой. При освещении образцов со стороны исходного кремния фотоответ практически отсутствовал. Измерение фотолюминесценции осуществлялось аналогично описанному в [2].

### Результаты и их обсуждение

Исследованные образцы имели выпрямляющую вольт-амперную характеристику (ВАХ) с пропускным направлением, соответствующим отрицательному потенциалу на слое ПК. ВАХ для одного из

образцов при 300 К показана на рис. 1. При прямом смещении ток *I* линейно зависит от напряжения *V*,

$$I = (V - V_c)/R,$$

с напряжением отсечки  $V_c \approx 1.5$  В и остаточным сопротивлением *R* от 2 до 10 Мом. Более тонким слоям ПК соответствует меньшее *R*. Пробой наступает при обратном смещении  $V_r$ , превышающем 300 В. Ток насыщения составляет  $(2 \div 6) \cdot 10^{-8}$  А. С понижением толщины слоя ПК наблюдается уменьшение *R*.

При освещении структур со стороны ПК наблюдается фотовольтаический эффект с отрицательным зарядом на слое ПК и чувствительностью по напряжению  $S_u = 20 \div 50$  В/Вт и по току короткого замыкания  $S_i = 0.5 \div 1$  мА/Вт. Величина эффекта не зависит от расстояния между освещенным участком и контактом, поэтому эффект можно считать обусловленным

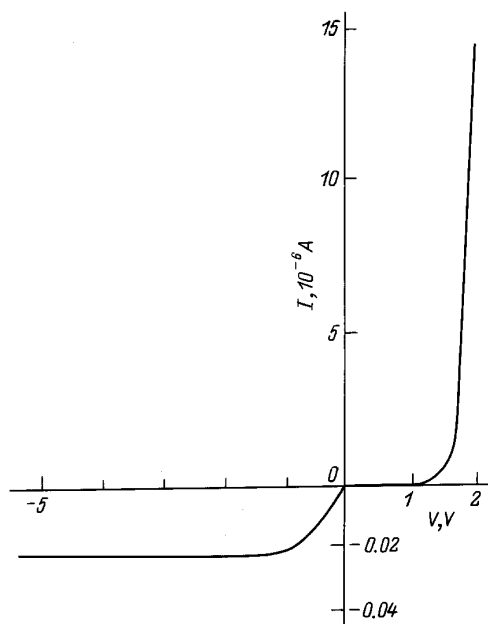
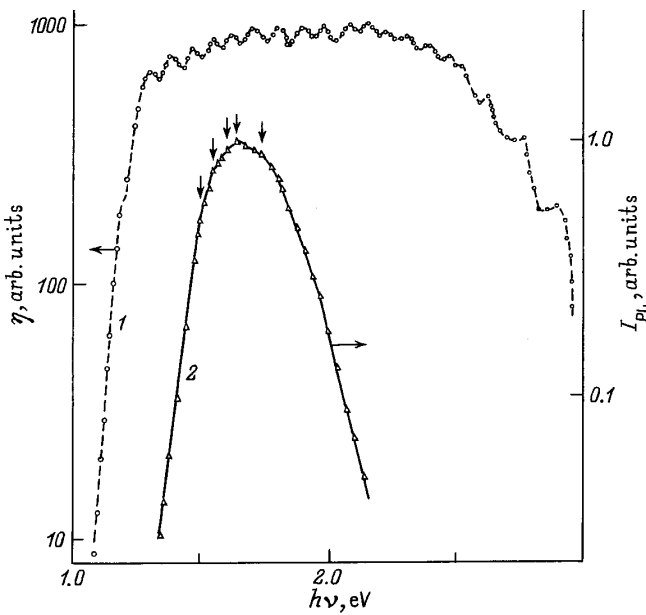


Рис. 1. Стационарная вольт-амперная характеристика границы пористого и монокристаллического кремния при 300 К. *d* = 5 мкм.



**Рис. 2.** Спектральные зависимости в гетероструктуре кремний–пористый кремний: 1 — относительная квантовая эффективность фотопреобразования  $\eta$  при 300 К, неполяризованном излучении, угла падения  $0^\circ$ , освещении со стороны пористого кремния; 2 — фотолюминесценция ( $I_{PL}$ ) при 300 К.

разделением фотогенерированных носителей заряда в электрическом поле на гетерогранице кремний–ПК.

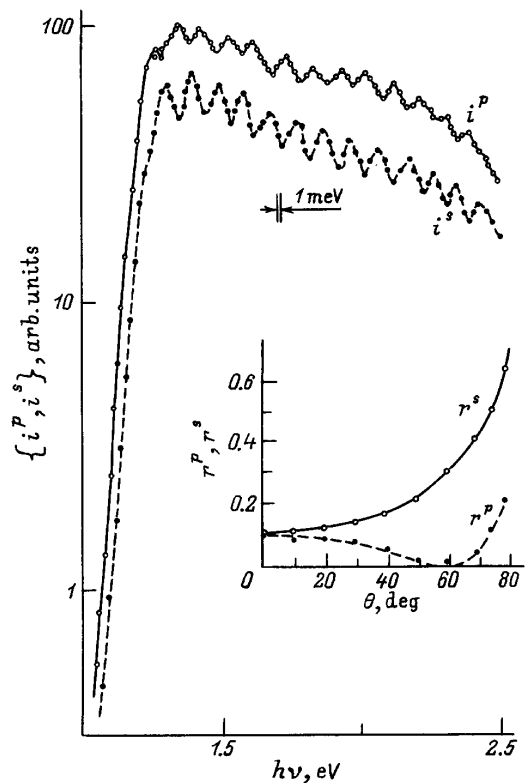
На рис. 2 показана типичная спектральная зависимость квантовой эффективности фототовета  $\eta$ , полученной как отношение фототока короткого замыкания к числу падающих вдоль нормали к поверхности ПК фотонов. Длинноволновая граница спектра совпадает с краем поглощения кремния и зависимость  $\eta$  от  $h\nu$  имеет экспоненциальный характер. Коротковолновая граница обусловлена, по-видимому, собственным поглощением в ПК [5]. Для более тонких слоев ПК эта граница сдвинута в сторону больших энергий фотонов (до  $\sim 3$  эВ для толщин  $d \approx 1$  мкм).

В области высокого уровня фототовета в спектре наблюдается около 20 максимумов и минимумов  $\eta$ . Среднее расстояние между соседними максимумами для слоя толщиной 5 мкм равно  $\sim 90$  мЭВ. Оценка показателя преломления  $n$  осуществлялась по формуле  $n = \lambda_m \lambda_{m-1} / 2d(\lambda_m - \lambda_{m-1})$ , где  $\lambda_m$  — длина волны света, соответствующая максимуму фототовета,  $m$  — порядок интерференции. Полученные для разных образцов величины показателя преломления лежат в пределах  $1.6 \div 1.8$ , что соответствует известным значениям [7,8]. Наличие богатой интерференционной картины в спектрах фоточувствительности гетероструктур кремний–ПК свидетельствует о высокой однородности слоев ПК.

На рис. 2 кроме спектра фоточувствительности показан спектр фотолюминесценции (ФЛ) того же образца. Как видно, ФЛ наблюдается в спектральном

диапазоне максимальной фоточувствительности. При 300 К в спектре ФЛ наблюдаются не осцилляции, а только ступеньки, положение которых не совпадает с экстремумами в спектре фоточувствительности. Это свидетельствует о неинтерференционной природе тонкой структуры в спектрах ФЛ пористого кремния [9,10].

При освещении тех же гетероструктур линейно поляризованным излучением квантовая эффективность фототовета не зависела от направления поляризации света относительно главных кристаллографических осей подложки гетероструктуры во всей области фоточувствительности при нормальном падении света на поверхность слоя. При наклонном падении света на слой ПК фототовет для света с электрическим вектором  $\mathbf{E}$ , совпадающим с плоскостью падения, ( $i^p$ ) превышает фототовет, соответствующий  $\mathbf{E}$ , перпендикулярному плоскости падения, ( $i^s$ ). На рис. 3 показаны спектральные зависимости фототовета для обеих поляризаций света, падающего под углом  $75^\circ$ . Как видно из рис. 3, интерференционная картина и спектральный диапазон фоточувствительности близки к таковым в случае освещения структур неполяризованным светом. Различия в величинах фототовета при различных поляризациях находится в пределах различия в интенсивностях света, прошедшего в обра-



**Рис. 3.** Спектральные зависимости фототоков  $i^p$  и  $i^s$  для гетерограницы кремний–пористый кремний при падении света под углом  $75^\circ$  при 300 К. На вставке — зависимости коэффициентов отражения ( $r^p, r^s$ ) на границе воздух–ПК для двух поляризаций от угла падения  $\theta$ .

зец, и обусловлено разными коэффициентами отражения. На вставке к рис. 3 показаны угловые зависимости коэффициентов отражения  $r^p$  и  $r^s$  на границе воздух–ПК для двух поляризаций при показателе преломления 1.8 [11]. Из вставки видно, что отличие  $r^p$  и  $r^s$  при  $75^\circ$  достаточно велико, чтобы объяснить различие в величинах фотоответа. Таким образом, в отличие от фотолюминесценции пористого кремния, проявляющей частичную поляризацию [12,13], фотоактивное поглощение является изотропным.

## Заключение

Исследование спектра фоточувствительности гетероструктуры пористый кремний–кремний, выполненное в работе, показывает, что фоточувствительность структуры связана с разделением фотогенерированных носителей заряда на границе кремний–пористый кремний. Высокая фоточувствительность наблюдается в окне между краями поглощения кремния и пористого кремния. Тонкая структура спектра фоточувствительности связывается с интерференцией света. Определен показатель преломления люминесцирующего пористого кремния. Из поляризационных измерений делается вывод об изотропном характере фотоактивного поглощения исследуемой структуры.

## Список литературы

- [1] L.T. Canham. Appl. Phys. Lett., **57**, 1046 (1990).
- [2] E.V. Astrova, A.A. Lebedev, A.D. Remenyuk, Yu.V. Rud'. Japan. J. Appl. Phys., **34**, 251 (1995).
- [3] C. Tsai, K.-H. Li, D.S. Kinosky, R.Z. Quian, T.C. Hsu, J.T. Irby, S.K. Banerjee, A.F. Tasch, J.C. Campbell. Appl. Phys. Lett., **60**, 1700 (1992).
- [4] S.M. Prokes. Appl. Phys. Lett., **62**, 3244 (1993).
- [5] Е.В. Астрова, А.А. Лебедев, А.Д. Ременюк, Ю.В. Рудь. ФТП, **29**, 1649 (1995).
- [6] Ю.В. Рудь. Изв. вузов, вып. 8, 68 (1986).
- [7] Е.В. Астрова, С.В. Белов, А.А. Лебедев. ФТП, **28**, 332 (1994).
- [8] C. Mazzoleni, L. Pavesi. Appl. Phys. Lett., **67**, 2983 (1995).
- [9] Н.С. Аверкиев, В.М. Аснин, И.И. Марков, А.Ю. Силов, В.И. Степнов, А.Б. Чурилов, Н.Е. Мокроусов. Письма ЖЭТФ, **55**, 657 (1992).
- [10] Е.В. Астрова, А.А. Лебедев, А.Д. Ременюк, Ю.В. Рудь. Письма ЖТФ, **20**, вып. 15, 33 (1994).
- [11] Г.С. Ландсберг. *Оптика* (М., Наука, 1976) с. 474.
- [12] А.Н. Старухин, А.А. Лебедев, Б.С. Разбирин, Л.М. Капитонова. Письма ЖТФ, **18**, вып. 16, 33 (1994).
- [13] S.V. Gaponenko, V.K. Kononenko, E.P. Petrov, I.N. Germanenko, A.P. Stupak, Y.H. Xie. Appl. Phys. Lett., **67**, 3019 (1995).

Редактор Л.В. Шаронова

## Photosensitivity of silicon–porous silicon heterostructures

E.V. Astrova, A.A. Lebedev, A.D. Remenyuk, 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** The experimental studies of photoelectric properties of silicon–porous silicon heterostructures are presented. The rectifying heterostructures with the photosensitivity up to 1 mA/W in voltage range 1.2–2.3 eV at 300 K are produced. The photocurrent oscillations due to light interference in porous silicon layers are found. Polarization dependence of photosensitivity of heterostructures is studied.