

Транспортные свойства и фоточувствительность структур металл/пористый кремний/*c*-Si

© Д.Г. Яркин

Институт редких металлов,
109017 Москва, Россия

(Получена 28 мая 1997 г. Принята к печати 15 сентября 1998 г.)

Вольт-амперные характеристики, фоточувствительность и импеданс были исследованы для структур Al/пористый кремний/*c*-Si (*p*-типа) с толщиной пористого слоя $0.2 \div 6$ мкм и пористостью 80%. Показано, что в области обратных и небольших прямых смещений ток определяется потенциальным барьером подложки *c*-Si у изотипного гетероперехода (пористый кремний)/*c*-Si. Фоточувствительность определяется поглощением света в подложке *c*-Si. Потенциальный барьер контакта металл/(пористый кремний) не влияет на фоточувствительность и на вольт-амперные характеристики структур. Экспериментальные зависимости импеданса структур от приложенного постоянного смещения, толщины слоя пористого кремния и частоты хорошо согласуются с теоретическими, если использовать эквивалентную схему, включающую две последовательно соединенные параллельные RC-цепочки из сопротивления и геометрической емкости слоя пористого кремния, а также сопротивления и емкости потенциального барьера подложки *c*-Si.

С тех пор как в слоях пористого кремния (ПК) была обнаружена фотолуминесценция с эффективностью в несколько процентов при комнатной температуре, этот материал стал объектом интенсивных исследований. Продемонстрирован значительный прогресс в параметрах электролюминесцентных структур [1], однако эффективность электролюминесценции еще остается невысокой. Продолжается также изучение свойств приборных структур. Исследование фоточувствительности структур металл/ПК/*c*-Si показало, что фоточувствительность обусловлена потенциальным барьером на гетерогранице ПК/*c*-Si [2–4]. Из анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ) в работах [5,6] сделан вывод, что структуры металл/ПК/*c*-Si могут быть представлены как включенные последовательно: барьер контакта металл/ПК и сопротивление слоя ПК. Напротив, авторами работ [7,8] показано, что структуры металл/ПК/*c*-Si могут быть представлены как включенные последовательно: сопротивление ПК и потенциальный барьер в *c*-Si на гетерогранице ПК/*c*-Si. Таким образом, остается не вполне ясной роль контакта металл/ПК в транспортных свойствах структур металл/ПК/*c*-Si.

В данной работе приводятся результаты измерений импеданса и фоточувствительности структур металл/ПК/*c*-Si со слоем ПК высокой пористости, подтверждающие, что потенциальный барьер контакта металл/ПК не влияет не только на фоточувствительность, но и на ВАХ структур.

Структуры Al/ПК/*c*-Si изготавливались на подложках *c*-Si(111) *p*-типа проводимости ($10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) с тыльным алюминиевым омическим контактом. Слои пористого кремния толщиной $d = 0.2 \div 6$ мкм получали анодным травлением подложек в растворе $\text{HF}(48\%):\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 3:5$ в течение $20 \div 600$ с при плотности анодного тока $13 \text{ mA}/\text{cm}^2$. Алюминиевые контакты, напыленные на слой пористого кремния общей площадью $A = 65 \text{ мм}^2$, состояли из контактной площадки

площадью 3.8 мм^2 (толстый слой Al) и полупрозрачного контакта площадью 2.7 мм^2 (пропускание 50%) для фотоэлектрических измерений. Измерения проводились через две недели после изготовления структур, когда их характеристики становились стабильными во времени.

Из измерений спектров оптического пропускания слоя ПК на подложке *c*-Si в инфракрасной области излучения было получено, что коэффициент преломления слоя ПК равен $n_{IR} = 1.35$. Полученное значение n_{IR} соответствует 80% пористости, если материал состоит только из *c*-Si и воздуха. Присутствие других атомов (O, C) в приповерхностном слое нанокристаллитов можно не учитывать, поскольку после двух недель выдержки на воздухе проведенные измерения методом масс-спектрометрии вторичных ионов дают значения концентраций кислорода и углерода порядка $1.5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 1 показаны вольт-амперные ($I - V$) характеристики структур Al/ПК/*c*-Si с толщиной слоя ПК 2 и 0.2 мкм, измеренные в темноте и при освещении светом лампы накаливания интенсивностью $1 \text{ мВт}/\text{см}^2$. Положительному смещению соответствует соединение подложки *c*-Si с плюсом источника питания. Видно, что темновые ВАХ структур с различной толщиной ПК очень близки друг к другу. Это значит, что обратный ток не зависит от толщины ПК и определяется барьером Al/ПК или гетерограницей ПК/*c*-Si. Прямой ток при смещении в несколько вольт для структуры со слоем ПК 2 мкм лишь в 1.5 раза меньше прямого тока для структуры с слоем ПК 0.2 мкм. Это говорит о том, что ток при большом прямом смещении ограничен не сопротивлением слоя ПК, а, по-видимому, сопротивлением контакта металл/ПК. В ряде работ было показано, что прямой ток в структурах металл/ПК/*c*-Si представляет собой ток, ограниченный пространственным зарядом [9]. Об этом свидетельствует близкая к виду $I \sim 1/d^3$ зависимость тока от толщины слоя ПК. Такая зависимость была получена также и нами для структур с толщиной слоя ПК $2 \div 6$ мкм.

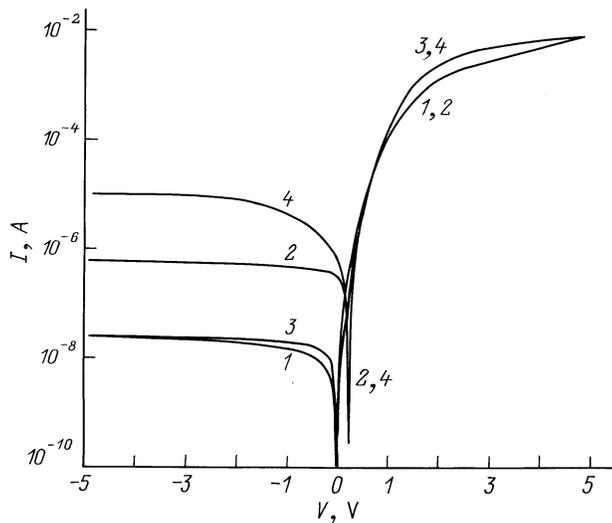


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики структур Al/PK/c-Si с толщиной слоя ПК 2 мкм (1, 2) и 0.2 мкм (3, 4), измеренные в темноте (1, 3) и при освещении (2, 4) лампой накаливания.

Из рис. 1 видно, что фототок в структуре Al/PK/c-Si со слоем ПК 2 мкм примерно на порядок меньше фототока в структуре со слоем ПК 0.2 мкм. Было также установлено, что фототок сильно возрастает с ростом температуры. Причина заключается в ограничении фототока высоким последовательным сопротивлением слоя ПК (более подробно этот вопрос рассмотрен в работе [7]). Это подтверждается измерением люкс-амперных зависимостей структур Al/PK/c-Si различной толщины. При использованной интенсивности света напряжение холостого хода V_{oc} равно $0.2 \div 0.25$ В для всех структур.

Форма спектров fotocувствительности всех исследованных структур Al/PK/c-Si с пористостью 80% и структуры Al/c-Si была одинаковой. В случае менее пористого слоя ПК коротковолновая граница fotocувствительности смещалась в область больших длин волн. Это подтверждает результаты работ [2–4] и свидетельствует о том, что фотогенерированные носители разделяются в области пространственного заряда (ОПЗ) на гетерогранице PK/c-Si со стороны подложки c-Si. Отсутствие фототока, обусловленного барьером на границе Al/PK, однако, еще не доказывает, что этот барьер отсутствует или мал. Доказательство того, что этот барьер мал, получено из измерений импеданса.

Емкость C_S и сопротивление R_S структур Al/PK/c-Si были исследованы в диапазоне частот $\omega = 10 \div 10^6$ Гц. Измерения проводились с использованием последовательной схемы замещения, т. е. предполагалось, что комплексное сопротивление структуры равно $R_S + 1/i\omega C_S$. При высоких частотах переменного сигнала емкость C_S не зависела от частоты. При этом C_S , видимо, определяется барьерной емкостью подложки c-Si C_{Si} и емкостью

слоя ПК C_{PS} , включенными последовательно:

$$C_S = \frac{C_{PS}C_{Si}}{C_{PS} + C_{Si}}.$$

Экспериментально измеренные зависимости C_S от толщины слоя ПК и от приложенного постоянного обратного смещения подтверждают это предположение.

На рис. 2 показана зависимость емкости структур Al/PK/c-Si от толщины пористого слоя, измеренная при постоянном обратном смещении -2 В и частоте переменного сигнала 10^4 Гц. Там же показаны расчетные величины C_{PS} , C_{Si} и C_S . При расчетах предполагалось, что

$$C_{PS} = \frac{A\varepsilon_{PS}\varepsilon_0}{d},$$

$$C_{Si} = A \left[\frac{e\varepsilon_{Si}\varepsilon_0 N_a}{2(V_b - V)} \right]^{1/2},$$

где ε_{PS} и ε_{Si} — диэлектрические проницаемости ПК и c-Si соответственно, ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, N_a — концентрация акцепторов в подложке, V_b — изгиб зон. Были использованы следующие значения: $\varepsilon_{PS} = 1.82$ ($\varepsilon_{PS} = n_{IR}^2$), $\varepsilon_{Si} = 12$, $N_a = 1.5 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, $V_b = V_{oc} = 0.25$ В, $V = -2$ В. Из рисунка видно хорошее совпадение расчетной зависимости $C_S(d)$ с экспериментальной.

На рис. 3 показаны зависимости $1/C_S^2$ от постоянного смещения для структур с толщиной слоя ПК 2 и 0.2 мкм, измеренные при частоте переменного сигнала 10^4 Гц. Там же показаны расчетные зависимости $1/C_S^2(V)$. Из рис. 3 видно хорошее совпадение расчетных зависимостей с экспериментальными. Это особенно важно, если учесть, что при построении расчетных зависимостей фактически не использовались подгоночные параметры.

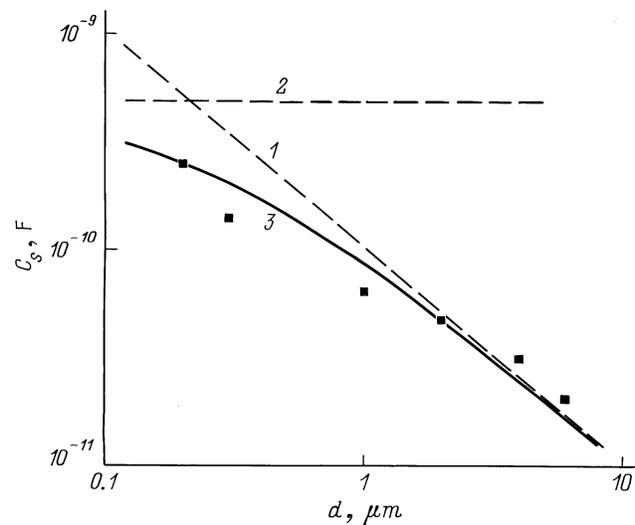


Рис. 2. Зависимость емкости структур Al/PK/c-Si C_S от толщины слоя ПК d . Для сравнения показаны расчетные зависимости $C(d)$ для геометрической емкости слоя ПК (1), барьерной емкости подложки c-Si (2) и емкости, соответствующей их последовательному соединению (3).

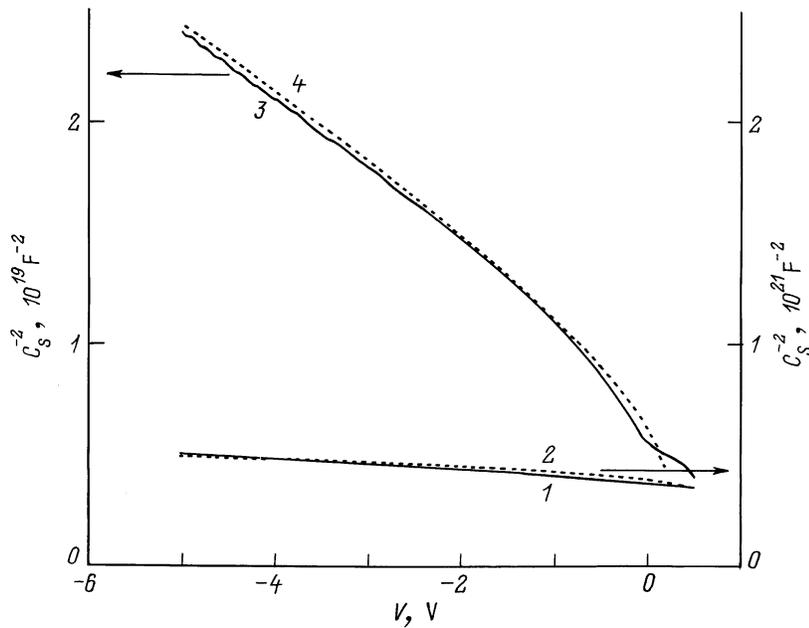


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные зависимости $1/C_S^2$ от постоянного смещения V для структур Al/ПК/c-Si с толщиной слоя ПК 2 мкм (1, 2) и 0.2 мкм (3, 4).

Все величины, входящие в формулы, определены экспериментально. Поскольку при построении расчетной зависимости предполагалось, что постоянное обратное напряжение целиком падает на барьере гетерограницы, согласие теории с экспериментом позволяет сделать вывод о том, что ток при обратном смещении ограничен сопротивлением этого барьера. Это свидетельствует о том, что высота потенциального барьера контакта металл/ПК гораздо меньше, чем высота потенциального

барьера на гетерогранице ПК/c-Si. По-видимому, как и в общем случае контакта металл/полупроводник [10], высота барьера металл/ПК определяется состоянием на границе раздела. Что касается барьера ПК/c-Si, то его наличие, очевидно, вызвано высокой концентрацией дефектов на гетерогранице [4]. Действительно, согласно теоретическим расчетам, проведенным в предположении отсутствия дефектов, на гетерогранице ПК/c-Si должна существовать обогащенная носителями область, а не потенциальный барьер [9].

При низких частотах емкость C_S зависит от частоты. Это можно понять, рассмотрев эквивалентную схему структуры Al/ПК/c-Si на рис. 4. Импеданс такой схемы согласно [11] определяется выражениями

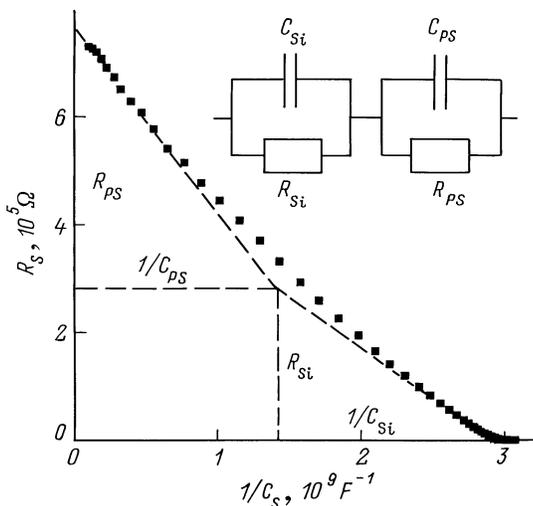


Рис. 4. Зависимость сопротивления на переменном токе R_S от емкости C_S , полученная из частотных зависимостей для структуры Al/ПК/c-Si с толщиной слоя ПК 0.2 мкм. Показаны также экстраполированные величины R_{PS} , C_{PS} , R_{Si} , C_{Si} , а на вставке — эквивалентная схема структуры Al/ПК/c-Si при обратном и нулевом смещении.

$$R_S = R_{Si} + R_{PS} - \left(\frac{\tau_1}{C_{Si}} + \frac{\tau_2}{C_{S2}} \right),$$

$$\frac{1}{C_S} = \frac{1}{C_{Si}} + \frac{1}{C_{S2}},$$

$$\frac{1}{C_{Si}} = \frac{(\omega\tau_1)^2}{C_{Si}[1 + (\omega\tau_1)^2]},$$

$$\frac{1}{C_{S2}} = \frac{(\omega\tau_2)^2}{C_{PS}[1 + (\omega\tau_2)^2]},$$

$$\tau_1 = R_{Si}C_{Si}, \quad \tau_2 = R_{PS}C_{PS}.$$

Измерение R_S и C_S в диапазоне частот от $\omega\tau_1 \ll 1$, $\omega\tau_2 \ll 1$ до $\omega\tau_1 \gg 1$, $\omega\tau_2 \gg 1$ позволяет определить сопротивление слоя ПК R_{PS} и барьера подложки c-Si R_{Si} , а также C_{PS} и C_{Si} . Результаты наших измерений показывают, что в исследованных образцах при нулевом смещении указанные условия выполняются при изменении частоты от 10^2 до 10^5 Гц.

На рис. 4 показаны зависимости R_S от $1/C_S$ для структур с толщиной пористого слоя 0.2 мкм, измеренные при нулевом смещении. Экспериментальные точки на кривых были получены в результате измерений R_S и C_S при разных частотах. Из рис. 4 видно, что зависимость R_S от $1/C_S$ состоит из двух близких к линейным участков с различным наклоном. Экстраполяция этих участков к соответствующим осям и точка пересечения экстраполяционных кривых дает величины R_{PS} , C_{PS} , R_{Si} и C_{Si} . Для структуры с толщиной слоя ПК 0.2 мкм было получено: $R_{PS} = 4.9 \cdot 10^5$ Ом, $C_{PS} = 690$ пФ, $R_{Si} = 2.7 \cdot 10^5$ Ом и $C_{Si} = 710$ пФ. Для структуры с толщиной слоя ПК 2 мкм (на рисунке не показано) второй участок слабо выражен, поскольку $C_{Si} \gg C_{PS}$. Поэтому были определены только параметры слоя ПК: $R_{PS} = 4.7 \cdot 10^6$ Ом и $C_{PS} = 52$ пФ. Полученный результат показывает, что сопротивление пористого слоя почти линейно зависит от толщины слоя. Найденное удельное сопротивление ПК составляет $\rho = R_{PS}C_{PS}/\varepsilon_{PS}\varepsilon_0 = 2 \cdot 10^9$ Ом·см. Следует отметить, что удельное сопротивление ПК само по себе может зависеть от частоты, однако полученное нами значение ρ хорошо согласуется со значениями удельного сопротивления сильнопористых слоев, полученных из измерений толстых структур ($d > 10$ мкм), в которых отсутствует выпрямление тока и ВАХ линейна [12].

Таким образом, проведенные исследования ВАХ, фоточувствительности и импеданса структур металл/ПК/*c*-Si (*p*-типа) показали, что в области обратных и небольших прямых смещений темновой ток определяется потенциальным барьером подложки *c*-Si у изотипного гетероперехода. Фоточувствительность определяется поглощением света в подложке *c*-Si. Потенциальный барьер контакта металл/ПК не влияет на фоточувствительность и на ВАХ структур. Зависимости емкости структур от постоянного смещения и толщины слоя ПК полностью определяются геометрической емкостью слоя ПК и емкостью ОПЗ подложки *c*-Si. Импеданс структур определяется двумя последовательно соединенными параллельными RC-цепочками (слой пористого кремния и ОПЗ в *c*-Si у гетероперехода).

Автор выражает благодарность А.Л. Балагурову и Е.А. Петровой за полезные дискуссии и предоставление образцов.

Список литературы

- [1] P.M. Fauchet. J. Lumm., **70**, 294 (1996).
- [2] J.P. Zheng, K.L. Jiao, W.P. Shen, W.A. Anderson, H.S. Kwok. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **283**, 371 (1993).
- [3] Е.В. Астрова, А.А. Лебедев, А.Д. Ременюк, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **31**, 159 (1997).
- [4] L.A. Balagurov, D.G. Yarkin, G.A. Petrovicheva, E.A. Petrova, A.F. Orlov, S. Ya. Andryushin. J. Appl. Phys., **82**, 4647 (1997).
- [5] D. Deresmes, V. Marissael, D. Stievenard, C. Ortega. Thin Sol. Films, **255**, 258 (1995).
- [6] K. Khirouni, J.C. Bourgoin, K. Borgi, H. Maaref, D. Deresmes, D. Stievenard. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **452**, 619 (1997).
- [7] M. Ben Chorin, F. Moller, F. Koch. J. Appl. Phys., **77**, 4482 (1995).
- [8] L. Pavesi. J. Microelectronics, **27**, 437 (1996).
- [9] C. Peng, K.D. Hirschman, P.M. Fauchet. J. Appl. Phys., **80**, 295 (1986).
- [10] A.G. Milnes, D.L. Feucht. *Heterojunctions and metal-semiconductor junctions* (Academic Press, N.Y.–London, 1972).
- [11] Л.С. Берман. *Емкостные методы исследования полупроводников* (Л., Наука, 1972).
- [12] Л.А. Балагуров, Н.Б. Смирнов, Е.А. Кожухова, А.Ф. Орлов, А.Я. Поляков. Изв. АН. Сер. физ., **58**, 78 (1994).

Редактор Т.А. Полянская

Transport properties and photosensitivity of metal/porous silicon/*c*-Si structures

D.G. Yarkin

Institute of Rare Metals,
109017 Moscow, Russia

Abstract Current-voltage characteristics, photosensitivity and impedance have been studied for Al/porous silicon/*c*-Si structures of *p*-type conductivity with 0.2–6 μm thick porous silicon layer of 80% porosity. It has been shown that at the reverse and at small forward bias current is determined by the potential barrier that exists in *c*-Si substrate on the isotype heterojunction. The photosensitivity is determined by the light absorption in *c*-Si substrate. The potential barrier of metal/porous silicon contact does not influence the photosensitivity and the current-voltage characteristics. Experimental dependences of impedance on the applied direct bias, thickness of porous silicon layer and frequency are fitted by calculated dependences using proposed equivalent circuit of the structure. The equivalent circuit is two series connected RC circuits representing porous silicon layer and *c*-Si potential barrier.