

УДК 621.315.592

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПРОХОЖДЕНИЯ ТОКА В ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ p -Si/ПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ/ SnO_2

В. Е. Сенюк, Г. Г. Унтила, А. Л. Харитонов, Л. Б. Рубин

(кафедра квантовой радиофизики; НИИЯФ)

В связи с необходимостью снижения стоимости фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) солнечной энергии [1] весьма актуальной является разработка новых типов ФЭП, в частности с поверхностно-барьерной структурой [2], к которым следует отнести и предложенную нами ранее структуру p -Si/полимерный материал/ SnO_2 [3]. Специально созданный для этой цели полимерный материал (ПМ) представляет собой оптически прозрачный диэлектрик, обладающий заметной электропроводностью при введении в его матрицу комплексов металлов переменной валентности [4]. Ранее мы обнаружили диодную темновую вольт-амперную характеристику (ВАХ), а также фотовольтаический эффект в разрабатываемой структуре [3]. Оказалось, однако, что напряжение холостого хода V_{xx} диода падает в несколько раз с уменьшением удельного сопротивления кремния с 80 до 1 Ом·см [5], хотя при прочих равных условиях увеличение уровня легирования полупроводника должно приводить к росту скачка потенциала в слое объемного заряда (изгиба зон), а значит, и V_{xx} , как это обычно имеет место, например, в $p-n$ переходах [6].

Выяснение причины низкого значения напряжения холостого хода рассматриваемых ФЭП для низкоомного кремния представляет интерес не только с научной, но и с практической точки зрения, так как именно низкоомный кремний используют в производстве солнечных элементов. Для того чтобы решить указанную задачу, необходимо установить природу взаимосвязи между изменением величины V_{xx} и другими свойствами ФЭП и в первую очередь — механизмом прохождения тока. В настоящей работе приведены результаты изучения температурных зависимостей вольт-амперных характеристик ФЭП, измеренных для образцов с разным уровнем легирования кремния.

В работе использовался монокристаллический кремний p -типа марки КДБ с ориентацией $\langle 100 \rangle$ и с удельным сопротивлением в диапазоне 1 ÷ 80 Ом·см (таблица). Пленка полимерного материала, приготовленная из поли-4-винилпиридина, содержащего $1,3 \cdot 10^{20}$ молекул на 1 см³ ацетилацетоната кобальта, имела толщину 1 ÷ 10 мкм. Электрический контакт с Si осуществлялся при помощи In—Ga эвтектики, а с SnO_2 — серебряной пастой.

На рис. 1 приведены прямые и обратные ВАХ диода 1.1 с удельным сопротивлением кремния 1 Ом·см в диапазоне температур $158 \text{ K} \leq T \leq 295 \text{ K}$, которые являются типичными для образцов 1.1—2.2 (см. таблицу). По наклону линейного участка ВАХ в области большого прямого смещения было найдено последовательное сопротивление диода R_s . Напряжение на барьере p -Si/ПМ, очевидно, равно $V - IR_s$, где I — ток, V — напряжение на образце. Видно, что наклон прямых ветвей ВАХ практически не зависит от температуры. Функцией (линейной) температуры является лишь величина $\ln I_s$, определяемая по точке пересечения графика с осью ординат. Таким образом, эксперимен-

<i>N</i>	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	4.1	5.1	5.2	5.3
ρ_{Si} , Ом · см	1	1	7,5	7,5	12	40	80	80	80
α , В ⁻¹ (<i>T</i> = 295К)	9,7	13	8,1	7,4	12,4	13,7	15,7	14,3	17,0
$\beta \cdot 10^2$, К ⁻¹	1,8	0,8	4,8	4,0	(1) 2,8	—	—	—	—
$E_{ак}$, эВ	—	—	—	—	(2) 0,33	(2) 0,33	(2) 0,30	(2) 0,22	(2) 0,18
<i>n</i>	(3) 3,7	(3) 3,0	(3) 4,7	(3) 5,7	3,2	2,9	2,5	2,7	2,3
I , мА/см ² ($V - IR_s = 0,4В$, <i>T</i> = 295К)	42	68	10	14	2	8	6	4	3
V_{xx} , В	0,11	0,07	0,19	0,13	0,31	0,29	0,37	0,39	0,42

Значения (1) получены при напряжении на барьере ($V - IR_s$) < 0,4 ÷ 0,65 В; (2) — при условии, что в формуле (3) $V(T) = A \cdot T^v$; (3) — из соотношения $\alpha = q/(nkT)$, $T = 295К$.

тальные данные для прямой ветви ВАХ образцов 1.1—2.2 при смещениях $V \geq 0,1$ В можно описать аналитическим выражением

$$I = I_s \exp [\alpha(V - IR_s)], \quad (1)$$

где $I_s = I_0 \exp(\beta T)$, $I_0 = \text{const}$, β — коэффициент, не зависящий от напряжения V , α — коэффициент, не зависящий от температуры T .

В интервале обратных смещений 0,05 В ≤ V ≤ 6 В измеренные токи диодов 1.1—2.2 можно описать эмпирическим выражением вида

$$I = A(T) V^{v(T)}, \quad (2)$$

где $A(T)$ — коэффициент, слабо зависящий от температуры, а $v(T)$ увеличивается от 1,1 до 1,7 с понижением температуры от 295 до 158 К.

На рис. 2 приведены прямые и обратные ВАХ диода 3.1 с удельным сопротивлением кремния 12 Ом · см. Видно, что существуют две области температур, в которых поведение прямых ветвей ВАХ различается. В области меньших смещений в диапазоне температур 159 К ≤ T ≤ 261 К наклон ВАХ диода 3.1 один и тот же для любых температур, а $\ln I_s$ линейно уменьшается с ее понижением. Аналитически ВАХ диода 3.1 в данной области прямых смещений и температур может быть описана формулой (1), как и для образцов 1.1—2.2. Наклон ВАХ диода 3.1 зависит от температуры во всей области прикладываемых прямых смещений для 261 К < T ≤ 295 К и в области больших смещений для 159 К ≤ T ≤ 261 К. Аналитически экспериментальные результаты ВАХ диода 3.1 в данной области прямых смещений и температур могут быть описаны выражением

$$I = B(T) \exp\left(-\frac{E_{ак}}{kT}\right) \exp\frac{q(V - IR_s)}{nkT}, \quad (3)$$

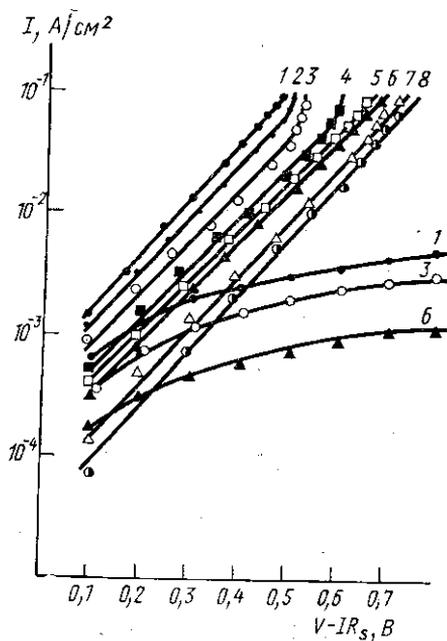


Рис. 1. Температурная зависимость ВАХ образца 1.1 ($\rho_{s1}=1$ Ом·см): $T=295$ (1); 283 (2); 263 (3); 213 (4); 232 (5); 216 (6); 178 (7) и 158 К (8)

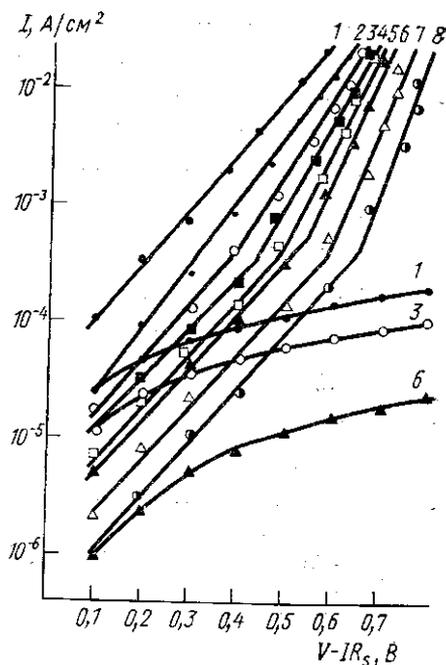


Рис. 2. Температурная зависимость ВАХ образца 3.1 ($\rho_{s1}=12$ Ом·см): $T=295$ (1); 289 (2); 261 (3); 241 (4); 228 (5); 218 (6); 191 (7) и 159 К (8)

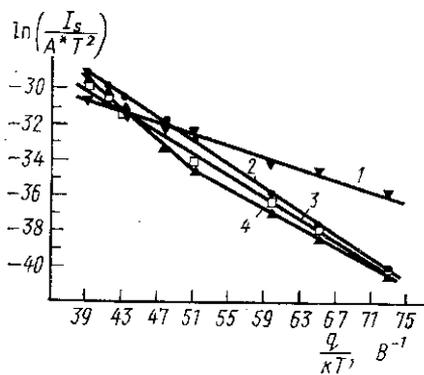


Рис. 3. Зависимость $I_s/(A \cdot T^2)$ от $q/(kT)$ для образцов 3.1 (3); 4.1 (4); 5.1 (2) ($\rho_{s1}=12 \div 80$ Ом·см)

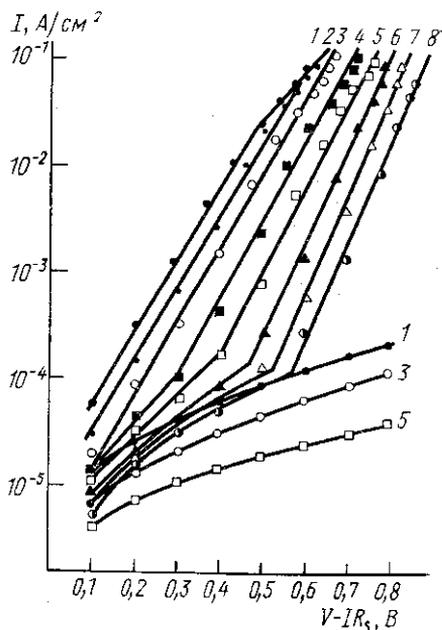


Рис. 4. Температурная зависимость ВАХ образца 5.1 ($\rho_{s1}=80$ Ом·см): $T=295$ (1); 283 (2); 271 (3); 243 (4); 222 (5); 193 (6); 178 (7) и 158 К (8)

где $B(T)$ — степенная функция температуры, $E_{ак}$ — энергия активации, k — постоянная Больцмана, q — заряд электрона, n — фактор качества диода. Наклон графика $\ln(I_s/A^*T^2)$ (рис. 3), где I_s — точка пересечения ВАХ с осью ординат и $A^* = 78 \text{ А/см}^2 \cdot \text{К}^2$ — постоянная Ричардсона, дает значение энергии активации, которое для диода 3.1 составляет 0,33 эВ.

На рис. 4 приведены прямые и обратные ВАХ диода 5.1 с удельным сопротивлением кремния $80 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, которые являются типичными для образцов 4.1—5.3 (см. таблицу).

Как и для образцов с $\rho_{Si} = 12 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, существует две области температур, в которых поведение прямых ветвей ВАХ различно. Экспериментальные данные на рис. 4 можно описать формулой (3) с энергией активации 0,3 эВ во всей области прикладываемых прямых смещений для $271 \text{ К} \leq T \leq 295 \text{ К}$ и в области больших смещений для $158 \text{ К} \leq T < 271 \text{ К}$. В области меньших смещений зависимость ВАХ от температуры не активационная и аналитически может быть описана формулой (2), где $\nu(T)$ изменяется от 1,1 до 1,8 в диапазоне температур от 222 до 158 К.

В интервале обратных смещений $0,05 \text{ В} \leq V \leq 6 \text{ В}$ ВАХ диодов 3.1—5.3 можно описать формулой (2), где показатель степени $\nu(T)$ изменяется от 1,4 до 2,4 в диапазоне температур от 296 до 158 К, а $A(T)$ — экспоненциальная функция температуры.

Из приведенных ВАХ диодов с поверхностно-барьерной структурой $p\text{-Si/ПМ/SnO}_2$ с различным уровнем легирования кремния видно, что ВАХ различаются как по величине тока при постоянном приложенном смещении, так и по характеру самой зависимости от температуры. Как уже отмечалось, для образцов 1.1—2.2 и 3.1 в определенной области температур и прямых смещений наклон ВАХ не зависит от температуры (см. рис. 1 и 2), что свидетельствует о туннельном механизме токопрохождения. Однако уровень легирования кремния слишком мал, чтобы вероятность прямого туннелирования сквозь слой объемного заряда в полупроводнике была значительной. Следовательно, наиболее вероятным механизмом прохождения тока в данном случае может быть многоступенчатое туннелирование носителей заряда сквозь слой объемного заряда полупроводника по состояниям внутри запрещенной зоны кремния [7, 8] с последующей их рекомбинацией на границе $p\text{-Si/ПМ}$.

Сильная зависимость наклона ВАХ от температуры для образцов 3.1—5.3 в соответствующих областях прямых смещений (см. рис. 2 и 4), по всей видимости, связана с транспортом носителей тока по механизму термоэлектронной эмиссии, причем ток может быть обусловлен как прямым туннелированием термовозбужденных носителей заряда сквозь барьер SiO_2 , так и их захватом на поверхностные состояния с последующей рекомбинацией [9—12]. При этом механизм термополевой эмиссии [13], по-видимому, не играет существенной роли даже в области самых низких исследуемых температур из-за сравнительно низкой степени легирования кремния ($N_a < 1,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, где N_a — концентрация легирующей примеси).

Параллельно с исследованием темновых ВАХ рассматриваемых диодов измерялись и их световые характеристики. В таблице приведены значения напряжения холостого хода V_{xx} ФЭП на основе $p\text{-Si/ПМ/SnO}_2$ при освещении белым светом интенсивностью 50 мВт/см^2 от 500-ваттной лампы накаливания через слой воды толщиной 4 см. Как видно, V_{xx} увеличивается с уменьшением уровня легирования кремния. Это хорошо согласуется с тем фактом, что темновой ток исследуемого

ФЭП уменьшается с понижением уровня легирования кремния при постоянном приложенном смещении.

Результаты настоящей работы свидетельствуют о том, что между величиной темнового тока ФЭП и механизмом прохождения тока существует связь, а именно: механизм многоступенчатого туннелирования приводит к большим по абсолютной величине темновым токам, нежели термоактивационные механизмы. Кроме того, механизм токопрохождения зависит от степени легирования кремния таким образом, что с увеличением уровня легирования кремния возрастает величина вклада тока многоступенчатого туннелирования в суммарный темновой ток диода.

Приведенные результаты показывают, что уменьшение величины V_{xx} с ростом уровня легирования кремния может быть связано с возрастанием темнового тока за счет механизма многоступенчатого туннелирования. Это позволяет сделать вывод о том, что для получения больших значений напряжений холостого хода ФЭП на основе $p\text{-Si}/\text{ПМ}/\text{SnO}_2$ для низкоомного кремния необходимо уменьшать вклад механизма многоступенчатого туннелирования в суммарный ток диода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Алферов Ж. И., Андреев В. М. // Преобразование солнечной энергии / Под ред. Н. Н. Семенова. Черногоровка, 1981. С. 7—20. [2] Singh R., Green M. A., Rajkanan K. // Solar Cells. 1981. 3. P. 95—148. [3] Рубин Л. Б., Унтила Г. Г., Пшежецкий В. С., Пролейко Е. В. // ДАН СССР. 1985. 281, № 2. С. 313—316. [4] Унтила Г. Г., Рубин Л. Б. // Там же. 1985. 281, № 2. С. 316—320. [5] Унтила Г. Г., Харитонов А. Л., Рубин Л. Б. // Там же. 1985. 284, № 4. С. 847—850. [6] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М., 1984. [7] Riben A. R., Feucht D. L. // Int. J. Electron. 1966. 20. P. 583—599. [8] Donnelley J. P., Milnes A. G. // Proc. IEE. 1966. 113. P. 1468—1476. [9] Rajkanan K., Anderson W. A. // Appl. Phys. Lett. 1979. 35. P. 421—423. [10] Kar S., Ashok S., Fonnash S. J. // J. Appl. Phys. 1980. 51. P. 3417—3421. [11] Nielsen O. M. // Ibid. 1983. 54. P. 5880—5886. [12] Varma S., Rao K. V., Kar S. // Ibid. 1984. 56. P. 2812—2822. [13] Padovani F. A., Stratton R. // Solid State Electron. 1966. 9. P. 695—707.

Поступила в редакцию
17.04.86

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1987. Т. 28, № 4

УДК 539.21:537.1;548.537.1

ТЕРМОЭДС В РЕЛАКСАЦИОННОМ РЕЖИМЕ

Ю. П. Дрожжев

(кафедра физики полупроводников)

§ 1. Введение. К релаксационным полупроводникам принято относить материалы [1], для которых максвелловское время релаксации (τ_M) значительно превышает характерное рекомбинационное время (τ_R):

$$\tau_M \gg \tau_R. \quad (1)$$

Неравенство (1) может легко выполняться при малой концентрации и/или подвижности носителей заряда. В этих условиях кинетика носителей заряда имеет ряд особенностей [1, 2] и протекает в условиях локальной квазистационарности, а не квазинейтральности, как в обычном случае (условие, обратное (1)). Появление в образце объемного заряда в стационарном случае может быть связано с имеющейся