

©1995 г.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*Е.Г.Гук, В.Б.Шуман, А.С.Зубрилов*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021, Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 8 декабря 1994 г. Принята к печати 13 декабря 1994 г.)

Экспериментально исследованы характеристики кремниевых солнечных элементов при 293 и 78 К. Показано, что температурный коэффициент полезного действия солнечного элемента сильно зависит от его электрофизических параметров.

Характеристики кремниевых солнечных элементов (СЭ) зависят от температуры. В работе [1] получена линейная зависимость от температуры в интервале  $283 \div 353$  К для напряжения холостого хода ( $U_{oc}$ ), тока короткого замыкания ( $I_{sc}$ ), коэффициента заполнения ( $FF$ ) и КПД ( $\eta$ ) СЭ со структурой  $p^+nn^+$  (сопротивление базы  $\rho_{bas} = 0.3$  Ом·см). Кроме того, в работе [1] изучалось влияние концентрации солнечного излучения на температурные коэффициенты упомянутых характеристик при изменении кратности потока ( $K_c$ ) от 1 до 100 солнц. В работе [2] исследована только зависимость  $\eta(T)$  для солнечного элемента со структурой  $n^+p$  ( $\rho_{bas} = 0.1, 0.3, 2.0, 10$  Ом·см) в интервале  $300 \div 373$  К и зафиксирован спад  $\eta$  с ростом температуры также по линейному закону, но температурный коэффициент был заметно выше, чем в работе [1]. Поскольку все эти результаты были получены при температурах вблизи комнатной и выше, представляется целесообразным измерить характеристики солнечных элементов при низких температурах, тем более что экстраполяция данных [1] в область низких температур может дать заведомо неверное значение  $FF \gtrsim 1$ .

Нами были изготовлены СЭ со структурой  $n^+pp^+$  ( $\rho_{bas} = 1 \div 3$  Ом·см) и исследованы их характеристики при 293 и 78 К. СЭ имели планарную структуру. Толщина кремниевой пластины составляла  $300 \div 350$  мкм. Глубина диффузионного  $p^+$ -слоя, снижающего эффективную скорость рекомбинации на тыльной поверхности, составляла  $\simeq 1$  мкм, его слоиное сопротивление  $R_{\square} = 5 \div 9$  Ом. Глубина эмиттерного  $p$ - $n$ -перехода под контактной сеткой составляла  $x_j = 1 \div 2$  мкм,  $R_{\square 1} = 12 \div 25$  Ом, а на остальной площади эмиттера —  $x_j \simeq 0.5$  мкм,

$R_{\square} = 50 \div 90 \text{ Ом}$ . Проводилось геттерирование примесей с глубокими уровнями; время жизни ( $\tau_n$ ) неосновных носителей заряда (ННЗ), измеренное методом Лэкса [3] на СЭ и тестовых структурах, составляло  $4 \div 15 \text{ мкс}$ . Толщина антиотражающего покрытия (пленки  $\text{SiO}$ )  $\approx 850 \text{ \AA}$ . Размеры структуры —  $4.6 \times 4.6 \text{ мм}^2$ , фотоактивная площадь —  $17.8 \text{ мм}^2$ . Контактная сетка выполнена с шагом  $200 \text{ мкм}$ , ширина металлизированных полос —  $10 \text{ мкм}$ . Как известно, основной вклад в последовательное сопротивление СЭ вносят сопротивления металлических контактов и фронтального легированного слоя. Вклад последнего, оцененный в соответствии с [4], составляет не более  $17 \text{ мОм}$ .

Исследование статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) показало, что при  $293 \text{ К}$  избыточные токи утечки не превышают  $10^{-7} \text{ А}$ , диффузионная составляющая плотности тока равна приблизительно  $10^{-12} \text{ А/см}^2$ , а коэффициент идеальности ВАХ  $n$  близок к единице ( $n < 1.05$ ) при плотности тока  $j \geq 10^{-3} \text{ А/см}^2$ . При  $78 \text{ К}$  избыточные токи утечки снижаются почти на порядок, диффузионный ток — на много порядков вследствие экспоненциального спада тока насыщения, а коэффициент идеальности остается близким к единице (рис. 1).

Нагрузочные характеристики измерялись при прерывистом освещении кварцевой лампой. На рис. 2 приведены нагрузочные характеристики для образца, ВАХ которого показана на рис. 1. Измерения характеристик как при  $293 \text{ К}$ , так и при  $78 \text{ К}$  проведены при интенсивности освещения, приблизительно соответствующей трехкратному солнечному потоку. У данного образца  $\tau_n \approx 10 \text{ мкс}$  и отношение толщины базы к диффузионной длине  $W/L_n \approx 1.7$ , где  $L_n = (D_n \tau_n)^{1/2}$ ,  $D_n$  — коэффициент диффузии ННЗ.

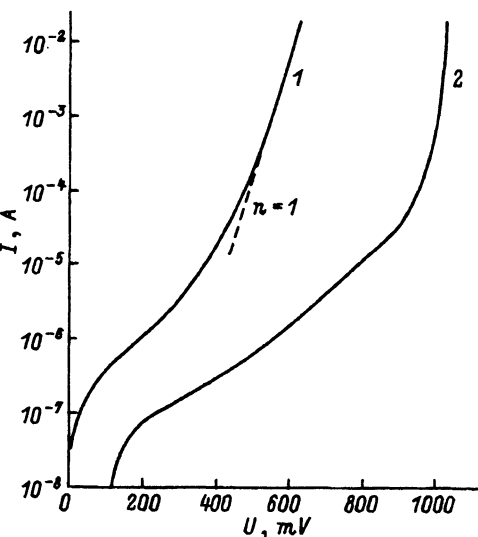


Рис. 1. Экспериментальные прямые вольт-амперные характеристики солнечного элемента. Температура  $T \text{ К}$ : 1 — 293, 2 — 78.

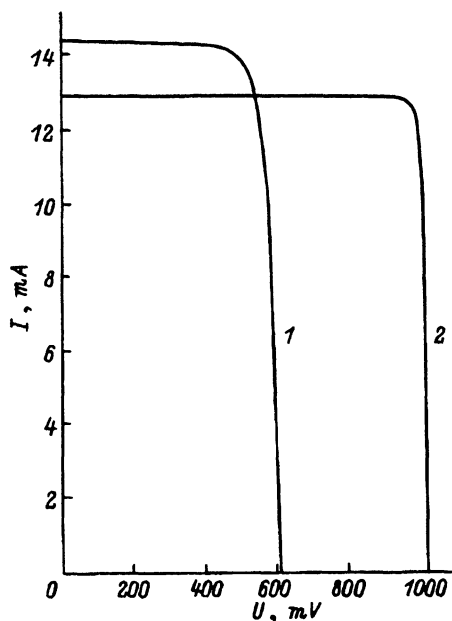


Рис. 2. Экспериментальные нагрузочные характеристики солнечного элемента при  $K_c \approx 3$ . 1 —  $T = 293 \text{ К}$ ,  $FF = 0.805$ ; 2 —  $T = 78 \text{ К}$ ,  $FF = 0.94$ .

Снижение температуры ведет к росту  $U_{oc}$ , и полученное значение

$$dU_{oc}/dT = -1.89 \pm 0.01$$

близко к приведенной в работе [1] величине 1.85 (для  $K_c = 3$ ). Коэффициент заполнения  $FF$  также возрастает от 0.805 до 0.94 за счет увеличения крутизны ВАХ и снижения последовательного сопротивления СЭ. Это дает

$$d(FF)/(FF)dT \simeq -0.72 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

Полученное значение несколько ниже, чем в работе [1], где для  $K_c = 3$  эта величина составляет примерно  $-0.85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . У данного СЭ при снижении температуры до 78 К  $I_{sc}$  убывает в 1.14 раза, но поскольку  $U_{oc}$  растет в 1.67 раза, а  $FF$  растет в 1.17 раза, то КПД при этом увеличивается в 1.7 раза (у этих СЭ  $\eta = (15-17)\%$  при источнике света АМ 1.5). Следует отметить, что у образцов, имевших меньшие значения  $\tau_n$ , при прочих равных условиях  $I_{sc}$  снижалось гораздо сильнее, и КПД  $\eta$  вырастал в меньшей степени. Действительно, соби́рание фотоносителей в значительной степени определяется величиной  $W/L$ . Чем больше отношение  $W/L$ , тем сильнее зависит соби́рание фотоносителей от этой величины [5]. При  $W/L \ll 1$  соби́рание почти полное и очень слабо зависит от изменения  $L$ . Такие СЭ описаны в работе [6] (температурная зависимость характеристик отсутствует). Эти образцы получены на бестигельном Si с уникальными характеристиками (при  $\rho_{bas} = 0.2 \div 0.3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ,  $\tau_n = 900 \text{ мкс}$ ), когда  $\tau_p$  определяется оже-рекомбинацией и слабо зависит от температуры. По-видимому, у таких СЭ соби́рание фотоносителей не должно зависеть от температуры (если пренебречь небольшим снижением фототока за счет температурной зависимости ширины запрещенной зоны), и при охлаждении КПД должен возрастать только за счет роста  $U_{oc}$  и  $FF$ . В СЭ, полученных на промышленном Si, как правило, соби́рание неполное ( $W/L \gtrsim 1$ ). При снижении температуры диффузионная длина у разных СЭ может меняться по-разному из-за ряда причин.

а) Для создания СЭ используется Si с концентрацией примеси, лежащей в широком диапазоне ( $10^{14} \div 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ). Температурный ход подвижности основных носителей заряда, а следовательно, и  $D_n$  для низкоомного и высокоомного кремния заметно отличаются [7] — у последнего в указанном диапазоне легирования базы при снижении температуры от комнатной до 78 К  $D_n$  растет в 3 раза быстрее, чем у низкоомного Si. Кроме того, следует учесть эффект, отмеченный в работе [8], — при комнатной температуре в низкоомном Si коэффициент диффузии электронов, если они являются неосновными носителями, на (10–15)% выше, чем в том случае, когда они являются основными носителями (электроны более эффективно рассеиваются на положительно заряженных ионах примеси, чем на отрицательных).

б) Объемная и поверхностная рекомбинация в разных СЭ может происходить на различных центрах рекомбинации, вследствие чего температурные зависимости времени жизни носителей заряда в разных СЭ могут различаться. Как известно, на температурную зависимость времени жизни  $\tau$  влияют уровень инжекции, концентрация ловушек, степень их заполнения и т.д. Поэтому возможен как рост  $\tau$  с понижением температуры, так и спад, в том числе экспоненциальный спад  $\tau$ ,

связанный с увеличением степени заполнения ловушек. Так, например, в одном из наших образцов при охлаждении до 78 К  $\tau_n$  упало в 25 раз. Если принять, что  $D_n$  выросло примерно в 4 раза [7], то получим, что диффузионная длина снизилась, а отношение  $W/L$  выросло в 2.5 раза. Естественно, для этого образца ток короткого замыкания  $I_{sc}$  снизился сильнее. Следовательно, при оценке  $I_{sc}$  нельзя пренебрегать температурной зависимостью подвижностей и диффузионных длин носителей заряда, как это сделано, например, в работе [9].

Таким образом, при охлаждении от комнатной температуры до 78 К КПД СЭ может вырасти не более чем вдвое. Температурный коэффициент КПД СЭ не является константой, а зависит от электрофизических параметров СЭ, и это — одна из возможных причин расхождения данных у разных авторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 94-02-05279-а.

### Список литературы

- [1] R.D. Nasby, C.M. Garner, F.W. Sexton, J.L. Rodriguez, B.H. Rose, H.T. Weaver. *Solar Cells*, **6**, 49 (1982).
- [2] E.L. Burgess, J.G. Fossum. *IEEE Trans.*, **ED-24**, 433 (1977).
- [3] B. Lax, S.F. Neustadter. *J. Appl. Phys.*, **25**, 1148 (1954).
- [4] A. De Vos. *Solar Cells*, **12**, 311 (1984).
- [5] M.P. Lammert, R.J. Schwartz. *IEEE Trans.*, **ED-24**, 337 (1977).
- [6] R.R. King, R.A. Sinton, R.M. Swanson. *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1460 (1989).
- [7] C. Jacoboni, C. Canali, G. Ottaviani, A. Quazanta. *Sol. St. Electron.*, **20**, 77 (1977).
- [8] A.V. Sproul, M.A. Green. *J. Appl. Phys.*, **70**, 846 (1991).
- [9] В.М. Андреев, В.А. Грилихес, В.Д. Румянцев. *Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения* (Л., Наука, 1989).

Редактор Т.А. Полянская