- Briassulis G., Andreopoulos J. // 20th Int. Symp. Shock Waves (1995). Abstracts. Pasadena, CA. Grad. Aeronaut. Lab. Calif. Inst. of Technol., 1995. P. 527.
- Братинкова Е.А., Штеменко А.С., Шугаев Ф.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1998. № 3. С. 63 (Моscow

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 621.315.592

University Phys. Bull. 1998. No. 3).

4. *Kiefer J.H., Hajduk J.C. //* Proc. 12th Int. Symp. Shock Waves and Tubes. Jerusalem, 1980. P. 97.

Поступила в редакцию 13.01.99

ВЛИЯНИЕ КОНТАКТА ПРОСВЕТЛЯЮЩЕЕ ПОКРЫТИЕ — ПОЛУПРОВОДНИК НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Г. Г. Унтила, А. С. Осипов, А. Б. Чеботарева

$(HИИЯ\Phi)$

Выводится аналитическое выражение для эффективного последовательного сопротивления солнечного элемента (СЭ) $(n^+ - p)$ Si с просветляющим покрытием из оптически прозрачного проводящего оксида, например оксида сплава индия и олова (indium-tin-oxide — ITO). Выражение показывает зависимость этого сопротивления от параметров СЭ, а именно от величины слоевого сопротивления ITO и n^+ -слоя, контактного сопротивления между n^+ -слоем и ITO, от ширины металлических полосок токособирающей сетки, а также от расстояния между ними.

Стандартные солнечные элементы (СЭ) из $(n^+ - p)$ Si обычно имеют диэлектрическое просветляющее покрытие. Поэтому фотогенерированный ток, инжектированный в n^+ -слой, течет к металлическим полоскам токособирающей сетки (ТСС) только через n^+ -слой (рис. 1). Обычно часть эффективного удельного последовательного сопротивления СЭ R_{sn} , связанную с распространением фототока по n^+ -слою, вычисляют с помощью выражения [1]

$$R_{sn} = \left(1 + \frac{w}{L}\right) R_n \frac{L^2}{3},\tag{1}$$



Рис. 1. Схема процесса съема тока в СЭ с просветляющим покрытием из ITO: $J_p(x)$ — плотность фототока, инжектированного в n^+ -слой; $V_n(x)$ — распределение потенциала вдоль n^+ -слоя; $DI_n(x)$ — распределение тока, протекающего по n^+ -слою; D — длина металлической полоски

где R_n — слоевое сопротивление n^+ -слоя, 2L — расстояние между полосками ТСС, w — полуширина этих полосок. Для СЭ с электропроводящим просветляющим покрытием некоторые авторы [2] применяют выражение типа (1), в котором вместо R_n используют эффективное слоевое сопротивление $R_nR_a/(R_n + R_a)$, где R_a — слоевое сопротивление просветляющего покрытия. Однако для таких СЭ эта часть последовательного сопротивления должна зависеть также от контактного сопротивления R_c между n^+ -слоем и пленкой ITO (*i*-слой на рис. 1) [3].

Целью данной работы было вывести аналитическое выражение для последовательного сопротивления СЭ типа ITO/ $(n^+ - p)$ Si, учитывающее наличие контактного сопротивления на границе ITO/ (n^+) Si.

Решение данной задачи проводится при обычных в таких случаях допущениях, а именно что величина контактного сопротивления между металлической полоской и n^+ -слоем пренебрежимо мала, а также что величина фототока J_p , инжектированного в n^+ -слой, не меняется вдоль этого слоя: $J_p(x) = \text{const.}$ Для получения формул, описывающих распределение тока в ITO, n^+ - и *i*-слоях, необходимо решить систему уравнений

$$\frac{dV_n}{dx} = -R_n I_n, \quad \frac{dV_a}{dx} = -R_a I_a,
\frac{dI_n}{dx} = J_p - J, \quad \frac{dI_a}{dx} = J,
V_n - V_a = JR_c.$$
(2)

которая в сочетании с граничными условиями

$$V_n(L) = DI_n(L)R_u, \quad V_a(L) = 0,$$

 $I_n(0) = 0, \quad I_a(0) = 0$ (3)

описывает процесс протекания тока на участке 0 < x < L.

Переменные V_n , V_a , I_n , I_a , J соответствуют рис. 1. Выражение для сопротивления подконтактной области R_u , фигурирующего в граничном условии (3), было получено в работе [4]: $R_u = (1/D)\sqrt{R_nR_c} \operatorname{cth}\left(\sqrt{R_n/R_c}w\right)$, где D — длина металлической полоски.

Решение данной системы уравнений имеет вид

$$egin{aligned} &I_a(x) = (J_p g_a) x + 2 J_p rac{A}{s} \operatorname{sh}(sx), \ &I_n(x) = (J_p g_n) x - 2 J_p rac{A}{s} \operatorname{sh}(sx), \ &J(x) = J_p g_a + 2 J_p A \operatorname{ch}(sx), \ &V_a(x) = 2 J_p A g_n R_c [\operatorname{ch}(sL) - \operatorname{ch}(sx)] + \ &+ J_p rac{g_n R_n}{2} (L^2 - x^2), \ &V_n(x) = 2 J_p A g_n R_c [\operatorname{ch}(sL) - \operatorname{ch}(sx)] + \ &+ J_p rac{g_n R_n}{2} (L^2 - x^2) + J_p g_a R_c + 2 J_p R_c A \operatorname{ch}(sx), \end{aligned}$$

где $s^2 = (R_a + R_n)/R_c, \ k^2 = R_n/R_c, \ g_a = R_n/(R_a + R_n), \ g_n = R_a/(R_a + R_n),$

$$A = \frac{sL}{2\operatorname{sh}(sL)} \frac{g_n kL \operatorname{cth}(kw) - g_a}{kL \operatorname{cth}(kw) + sL \operatorname{cth}(sL)}$$

Полная рассеиваемая мощность P в ITO, n^+ -, *i*-слоях и подконтактной области вычисляется по известной формуле

$$P = R_a D \int\limits_0^L I_a^2(x) \, dx +
onumber \ + R_n D \int\limits_0^L I_n^2(x) \, dx + R_c D \int\limits_0^L J^2(x) \, dx + R_u D^2 I_n^2(L).$$

Таким образом, удельное последовательное сопротивление СЭ, имеющего площадь D(L+w), можно представить в виде

$$R_{s} = \frac{P}{LDJ_{p}^{2}} \left(1 + \frac{w}{L}\right) = \left(1 + \frac{w}{L}\right) \times \\ \times \left\{\frac{R_{n}R_{a}}{R_{n} + R_{a}} \frac{L^{2}}{3} + R_{c} + R_{c}g_{n}^{2}\left(sL\operatorname{cth}(sL) - 1\right) - \right. \\ \left. - R_{c}\frac{\left(g_{n}sL\operatorname{cth}(sL) + g_{a}\right)^{2}}{sL\operatorname{cth}(sL) + kL\operatorname{cth}(kw)}\right\}.$$

$$(4)$$





Рис. 2. Зависимость измеряемого последовательного сопротивления $R_{sm} = R_s/(D(L+w))$, нормированного на $R_{sm}(w=0)$, от R_c : $R_a = 40$ Ом, L = 1,5 мм, w = 0,1 мм (I) и 0,05 мм (2), $R_n = 40$ (a), 80 (b) и 160 Ом (c)

Представляет интерес исследовать влияние ширины металлической полоски w на величину последовательного сопротивления. Формула (4) состоит из суммы четырех членов, умноженной на (1 + w/L), причем четвертый член суммы — единственный зависящий от w, он равен нулю при w = 0. Увеличение толщины полоски приводит к уменьшению измеряемого последовательного сопротивления $R_{sm} = R_s / [D(L+w)]$, но не более чем на 10% для всех рассмотренных значений других параметров (рис. 2). Отличительная особенность состоит в том, что, когда контактное сопротивление R_c возрастает, все кривые стремятся к величине L/(L+w). Для малых R_c ($R_c < 0,001$ Ом \cdot см 2) измеряемое сопротивление остается неизменным. Максимальное уменьшение R_{sm} (порядка 10%) наблюдается в диапазоне значений $0,01 < R_c < 1$ Ом \cdot см 2 . Это уменьшение убывает с возрастанием R_n/R_a и увеличением расстояния между полосками 2L.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 96-02-16812а).

Литература

- Dhariwal S.R., Mittal S., Mathur R.K. // Solid-State Electron. 1984. 27, No. 3. P. 267.
- 2. Яремчук А.Ф., Звероловлев В.Н., Павлов А.С., Раскин А.А. // Изв. вузов, Электроника. 1997. **5**. С. 51.
- Chaoui A., Ardebili R., Manifacier J.C. // Solar Cells. 1985. 14. P. 133.
- 4. Унтила Г.Г., Бартенев В.И., Рубин Л.Б. // ДАН СССР. 1985. **280**. С. 408.

Поступила в редакцию 18.11.98