

*Обработка материалов и поверхностей материалов,  
технологии и оборудование, сварка, резка, металлообработка*

**ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОВЕСНОГО  
ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА НА  
ВОЛЬТАМПЕРНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ  
СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
С СУБМИКРОНЫМ N-P-ПЕРЕХОДОМ**

Богатов Н.М., Матвеекин М.П.,  
Першин Н.В., Родоманов Р.Р.

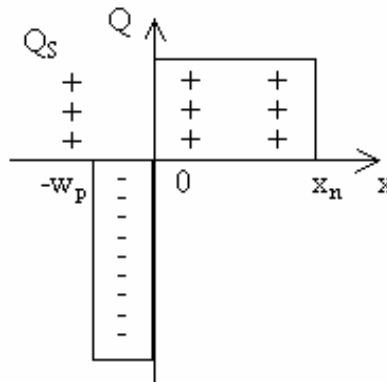
*Кубанский государственный университет,  
Краснодар*

Потери энергии в объеме современных полупроводниковых солнечных элементов (СЭ) сведены к минимуму. Это достигается использованием исходного полупроводникового материала, очищенного от посторонних примесей и дефектов, уменьшением толщины сильно легированных слоев, контролем физических и геометрических параметров неоднородных областей. Одной из тенденций совершенствования СЭ является уменьшение глубины  $r^+$ -n-перехода до значений  $w_p \leq 0,1$  мкм. В этих условиях возрастает доля потерь энергии, обусловленных процессами на поверхности и границах раздела диэлектрик-

полупроводник, полупроводник-полупроводник, металл-полупроводник.

Целью работы является исследование влияния неравновесного поверхностного заряда на вольтамперную характеристику (ВАХ) кремниевых двусторонних солнечных элементов с субмикронным поверхностным легированным слоем.

Проанализирована структура области пространственного заряда (ОПЗ) субмикронного несимметричного p-n-перехода (рис. 1). В этом случае размер части ОПЗ в p-слое  $x_p$  совпадает с толщиной этого слоя  $w_p$ , а в n-слое  $x_n$  много меньше толщины  $w_n$ . Распределение объемного заряда зависит от плотности заряда  $Q_s$  на поверхностных состояниях внешней границы p-слоя, концентрации акцепторов  $N_A$  и доноров  $N_D$ . Увеличение  $Q_s$  вследствие захвата фотогенерированных носителей заряда обуславливает уменьшение абсолютной величины электрического потенциального барьера p-n-перехода и размера ОПЗ в n-слое. Влияние этого эффекта на ВАХ освещенных приборов исследовано теоретически и экспериментально.



**Рисунок 1.** Условная схема распределения заряда Q в несимметричном p-n переходе

В неравновесном случае  $Q_s = Q_{s0} + \Delta Q_s$ . Индекс “0” обозначает равновесное значение соответствующей величины. Неравновесная плотность поверхностного заряда  $\Delta Q_s$  индуцирует падение напряжения на p-n-переходе

$$V_s = \frac{(w_p + x_n)}{\epsilon \epsilon_0} \Delta Q_s - \frac{1}{2} \frac{\Delta Q_s^2}{\epsilon e_0 q N_D}, \quad (1)$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $q$  – элементарный заряд. В правой части выражения (1) второе слагаемое меньше первого для допустимых значений физических величин.

Полное падение напряжения на p-n-переходе солнечного элемента

$$V = U + V_s + IR_s, \quad (2)$$

где  $U$  – напряжение на контактах прибора,  $I$  – электрический ток,  $R_s$  – сосредоточенное последовательное сопротивление. Световая ВАХ описывается формулой

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left\{ \frac{q(U + V_s + IR_s)}{kT} \right\} - 1 \right) - I_r \left( \exp \left\{ \frac{q(U + V_s + IR_s)}{akT} \right\} - 1 \right) - \frac{U + V_s + IR_s}{R_{sh}}, \quad (3)$$

где  $I_{ph}$  – фототок,  $I_0$  – диффузионный ток насыщения,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $I_r$  – рекомбинационный ток насыщения,  $a$  – коэффициент неидеальности p-n-перехода,  $R_{sh}$  – шунтирующее сопротивление [1].

Неравновесный поверхностный заряд в стационарном случае

$$\Delta Q_s \approx \frac{q N_{sf} I}{I + \beta}, \quad (4)$$

где  $N_{sf}$  – плотность состояний в окрестности уровня Ферми в энергетическом зазоре шириной  $\sim kT$ , коэффициент  $\beta$  характеризует скорость захвата неравновесных носителей заряда. Из (1, 4) следует, что

$$V_s \approx \frac{\Delta V \cdot I}{I + \beta}, \quad (5)$$

где

$$\Delta V = \frac{qN_{sf}(w_p + x_n)}{\epsilon\epsilon_0}$$

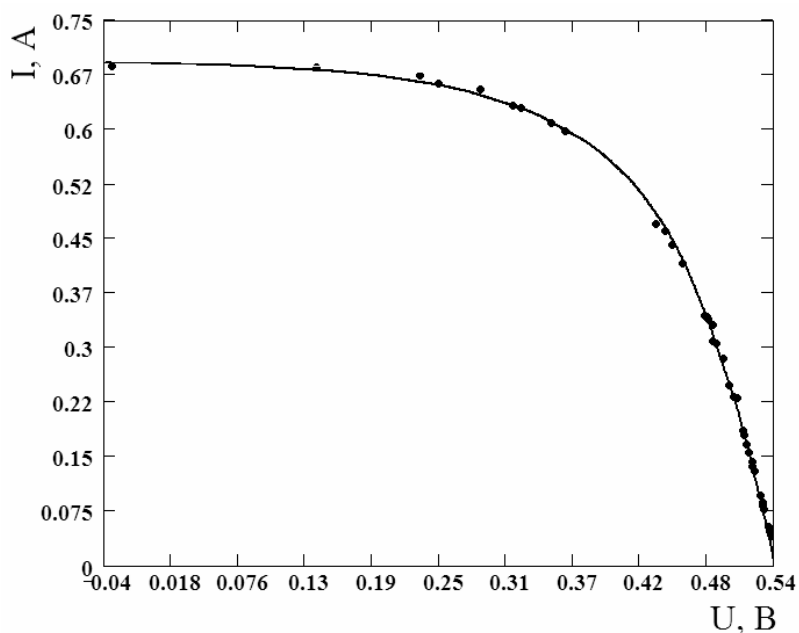
Исследовались двусторонние кремниевые СЭ р<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup> или n<sup>+</sup>-р-р<sup>+</sup> типа, с субмикронным диффузионным р-п-переходом глубиной  $w_p \approx 0,15$  мкм, текстурированной поверхностью, на которую наносилось пассивирующее просветляющее покрытие SiO<sub>2</sub>. Дополнительные потери собирания фотогенерированных носителей заряда в этих приборах указывают на образование неравновесного поверхностного заряда [2]. Для определения величин  $\Delta V$ ,  $\beta$  измерялись темновые и световые вольтамперные характеристики с помощью контрольно-измерительной информационной системы [2]. Значения  $\Delta V$ ,  $\beta$ ,  $I_{ph}$  и  $R_s$  вычислялись методом наименьших квадратов в результате аппроксимации световых ВАХ, полученных при различных условиях освещения, темновыми (рис. 2). Проводился также анализ взаимного соответствия ВАХ, измерен-

ных при освещении с лицевой и тыльной поверхностей СЭ.

Формула (5) имеет два предельных случая: 1 –  $I \gg \beta$ , тогда  $V_s \approx \Delta V$ ; 2 –  $I \ll \beta$ , тогда  $V_s \approx \Delta V \cdot I / \beta$ . Оба этих случая наблюдались экспериментально: первый – в режиме, близком к короткому замыканию при достаточно высоких уровнях освещенности, а второй – в области напряжения холостого хода. Найденные в результате обработки экспериментальных данных характерные значения лежат в диапазонах  $\Delta V \leq 0.1$  В,  $\beta \leq 1$  А.

Захват неравновесного поверхностного заряда является дополнительным источником потерь мощности солнечных элементов, так как индуцирует увеличение падения напряжения на р-п-переходе и тока инжекции. Вклад этого эффекта зависит от способа обработки поверхности и нанесения пассивирующего просветляющего покрытия.

Авторы благодарят директора НПФ "Кварк" Закса М.Б. и ведущего технолога Ситникова А.М. за предоставленные для исследований образцы.



**Рисунок 2.** Типичные вольтамперные характеристики СЭ: точки – световая ВАХ; сплошная линия – темновая ВАХ, сдвинутая по оси ординат вверх на  $I_{ph}$  и по оси абсцисс влево на  $\Delta V + I_{ph}R_s$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат. 1987. - 280 с.

2. Богатов Н.М., Матвеекин М.П., Родоманов Р.Р., Яковенко Н.А. //Автоматрия. - 2003. - Т. 39. - № 6. - С. 68.