

ПОТЕРИ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ С СУБМИКРОННЫМ N-P-ПЕРЕХОДОМ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ НАКОПЛЕНИЕМ НЕРАВНОВЕСНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА

Богатов Н.М., Матвейкин М.П., Родоманов Р.Р.

Кубанский государственный университет

Технология изготовления полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) непрерывно совершенствуется, так что потери энергии в объеме наиболее эффективных структур 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 усовершенствования ФЭП является уменьшение глубины p^+ - 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 величину внутреннего электрического потенциального барьера и ток короткого замыкания кремниевых фотоэлектрических структур с субмикронным эмиттером.

Проанализирована структура области пространственного заряда (ОПЗ) субмикронного несимметричного p - n -перехода (рис. 1). В этом случае размер части ОПЗ в p -слое совпадает с толщиной эмиттера w_p , а в n -слое – x_n много меньше толщины базы. Распределение объемного заряда зависит от плотности заряда Q_s на поверхностных состояниях внешней границы эмиттера, концентрации акцепторов в эмиттере N_A , и доноров в базе N_D .

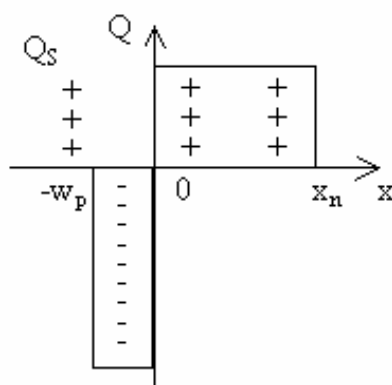


Рис. 1. Условная схема распределения заряда Q в несимметричном p - n переходе

На рис. 2 и рис. 3 изображены рассчитанные зависимости, соответственно, величины электрического потенциального барьера ϕ и x_n от плотности поверхностного заряда Q_s при следующих параметрах p - n -перехода: $w_p = 1,5 \cdot 10^{-7}$ м, $N_A = 10^{25}$ м $^{-3}$, $N_D = 10^{21}$ м $^{-3}$. Увеличение Q_s вследствие захвата фотогенерированных носителей заряда обуславливает уменьшение модуля электрического потенциального барьера p - n -перехода и размера ОПЗ в n -слое. Влияние этого эффекта на потери тока короткого замыкания планарных кремниевых фотоэлектрических структур исследовано теоретически и экспериментально.

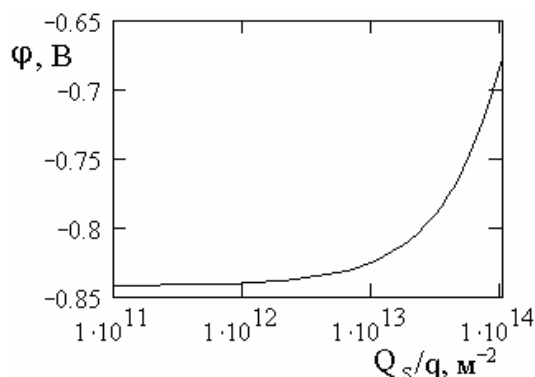


Рис. 2. Зависимость величины потенциального барьера от плотности поверхностного заряда

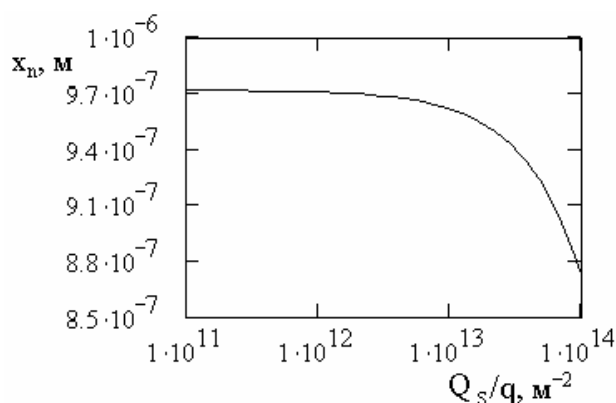


Рис. 3. Зависимость размера ОПЗ в n-слое от плотности поверхностного заряда

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

$$V_s = \frac{(w_p + x_{n0})}{\epsilon \epsilon_0} \Delta Q_s - \frac{1}{2} \frac{\Delta Q_s^2}{\epsilon \epsilon_0 q N_D}, \quad (1)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость, ϵ_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 в режиме электрической нагрузки

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

где U – напряжение на контактах прибора, I – электрический ток, R_s – сосредоточенное последовательное сопротивление. В режиме короткого замыкания ($U=0$) ток $I_{кз}$ вычисляется по формуле

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

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]. В стационарном случае

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

где N_{sf} – плотность состояний в окрестности уровня Ферми в энергетическом зазоре шириной $\sim kT$, коэффициент β характеризует скорость захвата неравновесных носителей заряда.

Из (1–4) следует, что $I_{кз}$ нелинейно зависит от I_{ph} , причем разность этих величин определяется величиной неравновесного поверхностного заряда. Эта зависимость продемонстрирована на рис. 3. Концентрация излучения X определялась с помощью эталонного ФЭП с глубоким p-n-переходом, у которого $I_{кз} \approx I_{ph0}X$. Исследовались кремниевые ФЭП со структурой p^+-n-n^+ или n^+-p-p^+ типа, глубиной p-n-перехода $w_p \approx 0,15$ мкм, текстурированной поверхностью, на которую наносилось пассивирующее просветляющее покрытие SiO_2 . Экспериментальная зависимость $I_{кз}(X)$ для исследуемого ФЭП аппроксимировалась по формуле (3). Для этого параметры $I_{ph} = I_{ph0}X$, I_0 , I_r , a , R_s , R_{sh} определялись из данных измерений темновых и световых вольтамперных характеристик [2]. Оценка спектральной плотности поверхностных состояний в окрестности уровня Ферми, полученная в результате аппроксимации, дает $N_{sfc} = N_{sf}/kT \sim 4 \cdot 10^{15} \text{ эВ}^{-1} \text{ м}^{-2}$.

Таким образом, обнаружен дополнительный механизм потерь тока короткого замыкания, заключающийся в увеличении тока инжекции за счет падения напряжения на p-n-переходе, индуцированного накоплением неравновесного поверхностного заряда, в структурах с субмикронным эмиттером. Для исследуемых ФЭП эти потери лежат в пределах от 9% до 19,7%.

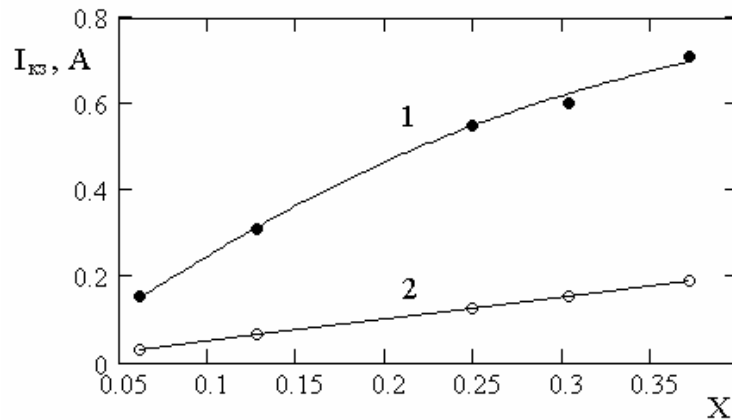


Рис. 3. Зависимость тока короткого замыкания от концентрации излучения X для исследуемого ФЭП (1) и эталонного ФЭП (2)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат. 1987. - 280 с.
2. Богатов Н.М., Матвейкин М.П., Родоманов Р.Р., Яковенко Н.А. // Автометрия. 2003. Т. 39. № 6. С. 68.