

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАХВАТА НЕРАВНОВЕСНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА В СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ПО СПАДУ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

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

Кубанский государственный университет,  
г. Краснодар, Россия

Одной из тенденций развития технологии полупроводниковых приборов является уменьшение глубины  $p$ - $n$ -перехода до субмикронных размеров  $w_p < 1$  мкм. В этом случае параметры области пространственного заряда (ОПЗ)  $p$ - $n$ -перехода зависят от концентрации акцепторов, доноров и плотности заряда на поверхностных состояниях внешней границы полупроводника.

Равновесный поверхностный заряд в полупроводниковых приборах изучен достаточно подробно [1]. Неравновесные эффекты, обусловленные захватом электронов (дырок) на поверхностные состояния, разнообразны и не изучены до конца. Влияние захвата неравновесного поверхностного заряда на спектральные характеристики кремниевых солнечных элементов (СЭ) исследовано в работах [2, 3].

Цель работы – определить время захвата неравновесного поверхностного заряда по затуханию тока короткого замыкания.

Обозначим изменение плотности поверхностного заряда в неравновесном режиме  $\Delta Q_s$ . Считаем, что  $\Delta Q_s$  не изменяет тип проводимости в поверхностной области, но влияет на величину потенциального барьера перехода. Эта ситуация реализуется, если область пространственного заряда перехода подходит вплотную к поверхности. Неравновесный поверхностный заряд вызывает изменение ширины ОПЗ  $p$ - $n$ -перехода и высоты потенциального барьера, что можно рассматривать как падение напряжения  $V_s$  на переходе.

Характерное время жизни неравновесных электронов  $\tau_n$ , дырок  $\tau_p$  в кремнии составляет 10÷100 мкс. Время измерения тока короткого замыкания  $t \gg \tau_n$ ,  $t \gg \tau_p$ . В этом временном масштабе параметры, обусловленные объемной рекомбинацией (фототок, диффузионный ток насыщения, рекомбинационный ток насыщения), квазистационарны, а вольтамперная характеристика описывается двух экспоненциальной моделью, в режиме короткого замыкания ток  $I_{sc}$  вычисляется по формуле

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

где  $I_{ph}$  – фототок,  $I_0$  – диффузионный ток насыщения,  $R_s$  – сосредоточенное последовательное сопротивление,  $I_r$  – рекомбинационный ток насыщения,  $a$  – коэффициент неидеальности  $p$ - $n$ -перехода,  $R_{sh}$  – шунтирующее сопротивление.

При низких уровнях освещенности

$$\frac{q(V_s + I_{sc}R_s)}{kT} \ll 1, V_s \sim \Delta Q_s.$$

Выразим  $I_{sc}$  через  $V_s$  из формулы (1) в линейном приближении:

$$I_{sc} \approx \frac{I_{ph} - \left( \left( I_0 + \frac{I_r}{a} \right) \frac{q}{kT} + \frac{1}{R_{sh}} \right) V_s}{1 + \left( I_0 + \frac{I_r}{a} \right) \frac{qR_s}{kT} + \frac{R_s}{R_{sh}}}. \quad (2)$$

Релаксация неравновесного поверхностного заряда  $\Delta Q_s = \Delta Q_0 \exp\{-t/\tau\}$  с характерным временем  $\tau \gg \tau_n, \tau \gg \tau_p$  обуславливает изменение тока короткого замыкания

$$I_{sc} = I_c + \Delta I \cdot \exp\{-t/\tau\}. \quad (3)$$

Измерения тока короткого замыкания СЭ выполнялись с помощью автоматизированного спектрального комплекса [2] по методике с низким уровнем освещенности. Погрешность измерений не превышала 5%. Исследовались двусторонние кремниевые СЭ, изготовленные НПФ "Кварк" (г. Краснодар), со структурой  $n^+ - p - p^+$  или  $p^+ - n - n^+$  типа, субмикронным (0,15 мкм)  $p - n$ -переходом, текстурированной поверхностью, на которую наносилось пассивирующее просветляющее покрытие  $SiO_2$ . В качестве образца-свидетеля использовался СЭ с глубоким плоским  $p - n$ -переходом.

Измерялось стационарное значение тока короткого замыкания  $I_{sc}$  при постоянных условиях освещения. Затем световой поток резко прерывался, и измерялась зависимость  $I_{sc}(t)$  на участке спада. У исследуемых СЭ наблюдался плавный участок спада функции  $I_{sc}(t)$ , а у образца-свидетеля  $I_{sc}$  изменялся скачком от одного постоянного значения к другому.

На рис. 1 показаны типичные временные зависимости тока короткого замыкания. Начальные участки соответствуют освещению светом с длиной волны  $\lambda=950$  нм (зависимость 1) и  $\lambda=1000$  нм (зависимость 2). Участки спада для обеих зависимостей описываются формулой (3) с  $\tau \approx 7$  с. Значения  $\tau$  не зависят от  $\lambda$  в пределах погрешности измерений.

Наблюдаемая у исследуемых СЭ нестационарность тока короткого замыкания с характерным временем  $\tau \sim 10$  с объясняется релаксацией неравновесного заряда на медленных поверхностных электронных состояниях границы  $Si - SiO_2$ , имеющих достаточно большие времена обмена носителями заряда с разрешенными зонами. Согласно данным [4] для этих процессов  $\tau$  может составлять  $10^{-1} - 10^4$  с и зависит от молекулярного состава межфазной границы. Текстурирование поверхности увеличивает площадь границы  $Si - SiO_2$  и  $p - n$ -перехода более чем в 10 раз, поэтому эффект влияния изменения плотности неравновесного поверхностного заряда на ток короткого замыкания возрастает вследствие увеличения эффективных значений  $I_0, I_r$  в формуле (1).

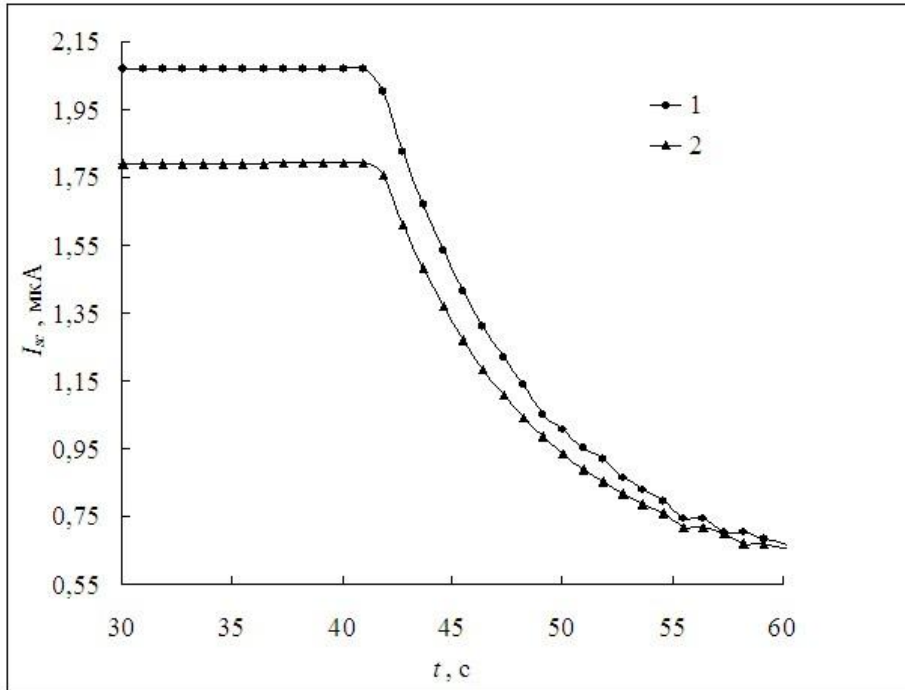


Рис. 1. Зависимость тока короткого замыкания от времени: 1 –  $\lambda=950$  нм; 2 –  $\lambda=1000$  нм

1. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов. Томск: НТЛ. 2000. - 426 с.
2. Богатов Н.М., Матвеекин М.П., Родоманов Р.Р., Яковенко Н.А. Автоматизация измерений спектральных характеристик двусторонних солнечных элементов. // Автометрия. 2003. Т. 39. № 6. С. 68-77.
3. Богатов Н.М., Корнеев А.И., Матвеекин М.П., Родоманов Р.Р. Исследование влияния неравновесного заряда границы  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  на динамику спектральной чувствительности солнечных элементов с субмикронным  $p\text{-}n$ -переходом // Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2006. № 2. С. 52–54.
4. Киселев В.Ф., Козлов С.Н., Зотеев А.В. Основы физики поверхности твердого тела. М.: МГУ. 1999. -284 с.