

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

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 ΔQ_s . Считаем, что ΔQ_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 τ_n , дырок τ_p в кремнии составляет 10÷100 нс. 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

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

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

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

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 τ не зависят от λ 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 τ 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).

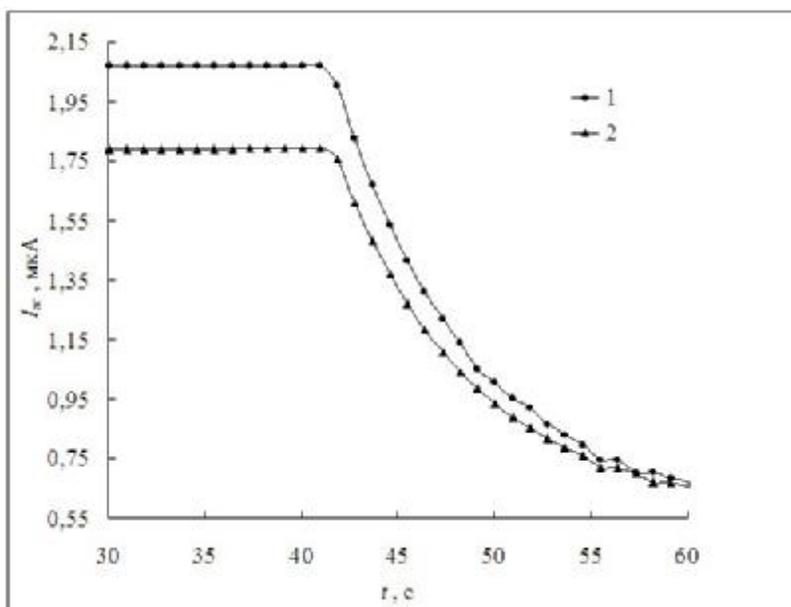


Рис. 1. Зависимость тока короткого замыкания от времени: 1 – $\lambda=950$ нм; 2 – $\lambda=1000$ нм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов. Томск: НТЛ. 2000. - 426 с.
2. Богатов Н.М., Матвейкин 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., Матвейкин М.П., Родоманов Р.Р. Исследование влияния неравновесного заряда границы $SiO_2 - Si$ на динамику спектральной чувствительности солнечных элементов с субмикронным $p - n$ -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.