

## НЕЛИНЕЙНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ В Si-МДП СТРУКТУРАХ

Д.И. Пунда, Ю.В. Рожнов

*Предложен метод дифференциальной рекомбинационной характеристики для исследования нелинейной рекомбинации в МДП структурах. На примере Si-МДП структур показано, что темп нелинейной рекомбинации в поверхностно-барьерных структурах может быть пропорционален экспоненте от полного избытка неравновесных носителей.*

Линейные рекомбинационные процессы в МДП структурах могут описываться временем жизни  $\tau$  неравновесных носителей заряда в приповерхностной области полупроводника, которое равно времени экспоненциального нарастания или спада сигнала линейной поверхностной фотоэдс при прямоугольном импульсном фотовозбуждении с длительностью импульса большей  $\tau$ . В случае нелинейной поверхностной фотоэдс нарастание и спад сигнала носят неэкспоненциальный характер, и могут сильно различаться по временным масштабам. Поэтому здесь нельзя ввести единого времени жизни. В литературе исследования нелинейных процессов при фотовозбуждении МДП структур ограничиваются, как правило, анализом амплитуды нелинейного фотоотклика [1-3]. Анализ параметров фотоотклика, непосредственно связанных с нелинейной рекомбинацией в поверхностно-барьерных структурах, отсутствует.

В данной работе предлагается исследовать нелинейную рекомбинацию в обедненных основными носителями Si-МДП структурах путем анализа дифференциальной рекомбинационной характеристики. Такой анализ основан на следующем рассмотрении. Если в процессе установления стационарного фотовозбуждения МДП структуры количество неравновесных неосновных носителей в области пространственного заряда (ОПЗ) много больше их количества в нейтральном объеме на длине  $L_D$  диффузии (условия реализации такого соотношения между количествами неравновесных носителей в ОПЗ и в нейтральном объеме рассмотрены в [1,4]) и глубина поглощения света  $\alpha^{-1} \ll L_D$ , то уравнение непрерывности можно записать в виде

$$d\Delta N/dt = g - R, \quad (1)$$

где  $\Delta N$  — концентрация неравновесных неосновных носителей в ОПЗ,  $g$  и  $R$  — соответственно темпы межзонной фотогенерации и рекомбинации неравновесных электронно-дырочных пар (все величины приведены к единице поверхности). Создадим дополнительно к  $g$  тестовое фотовозбуждение малой интенсивности  $\delta g$ , которое приводит к линейному фотоотклику МДП структуры. Из (1) получим  $d\delta N/dt = \delta g - \delta N/\tau_\delta$ , где  $\delta N$  — приращение  $\Delta N$  связанное с  $\delta g$ ,  $\tau_\delta$  — время нарастания или спада тестовой линейной поверхностной фотоэдс,

$$\tau_\delta^{-1} = dR/d\Delta N \quad (2)$$

— дифференциальная рекомбинационная характеристика.

Рассмотрим зависимость  $\tau_\delta^{-1}$  от  $g$  для МДП структуры  $p$ -типа. Положим уменьшение ширины ОПЗ  $W$  вследствие пространственного разделения неравновесных электронно-дырочных пар малым:  $\Delta W/W \ll 1$ , причем  $W \ll L_D$ . Введем безразмерный поверхностный потенциал  $y_s \equiv e\varphi_s/kT > 0$ . Для его изменения  $-\Delta y_s \ll 2y_s$ , имеем [4]:

$$\Delta y_s = -\beta \Delta N, \quad (3)$$

где  $\beta = \beta_0 \equiv W/2L^2 n_1$  в режиме фотоэдс по фотовозбуждению  $g$ ,  $\beta = \beta_0 (1 + W/d_s)^{-1}$  — в режиме постоянной подсветки по  $g$ , когда во внешней цепи прошел фототок. Здесь  $n_1$  и  $L$  — собственные концентрация и длина Дебая,  $d_s$  — приведенная толщина диэлектрика [2]. Будем считать, что объемная концентрация неравновесных носителей  $\Delta n$  на краю ОПЗ много меньше концентрации основных носителей. Тогда, если рекомбинация определяется диффузией в нейтральный объем, то в модели Шокли-Рида

$$R = \Delta n L_D / \tau_0, \quad (4)$$

где  $\tau_0$  — время жизни в нейтральном объеме. Воспользовавшись связью между  $\Delta n$  и  $\Delta N/2$  из (4) полу-

чим выражение для  $K$  как функции  $\Delta n$ . Дифференцируя это выражение в соответствии с (2) и полагая фотовозбуждение стационарным ( $R = g$ ), получим зависимость  $\tau_{\delta}^{-1}(g)$ , которая при  $g \rightarrow \infty$  имеет вид

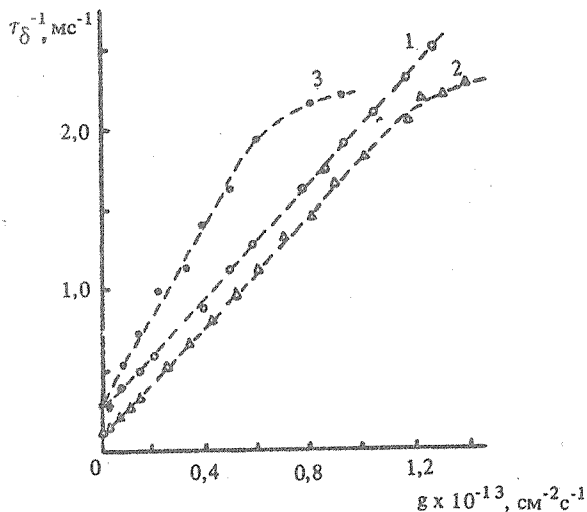
$$\tau_{\delta}^{-1} = \beta g. \quad (5)$$


Рис. 1. Зависимость дифференциальной рекомбинационной характеристики от темпа фотогенерации: 1 -  $|y_s| = 10$ ,  $\tau = 4$  мс; 2 -  $|y_s| = 17,5$ ,  $\tau = 43$  мс; 3 -  $|y_s| = 10$ ,  $\tau = 4$  мс (режим фотоэдс).

На рис. 1 приведена экспериментальная зависимость  $\tau_{\delta}^{-1}(g)$  для структуры Au (50%) - SiO<sub>2</sub> - Si p-типа (КЭФ-4,5), окисленной термически в сухом O<sub>2</sub>, с отжигом в сухом N<sub>2</sub> до и после окисления. Толщина диэлектрика 0,12 мкм ( $d_s \approx 0,37$  мкм). Измерения  $g$  проводились по методике, описанной в [4]. Кривые 1 и 2 относятся к режиму постоянной подсветки по  $g$ , кривая 3 - к режиму фотоэдс по  $g$ . Наклоны линейных участков кривых 1 и 2 практически одинаковы и составляют  $1,8 \cdot 10^{-10} \text{см}^2$ , что с точностью до  $\sim 15\%$  совпадает с расчетным значением  $\beta$ . Наклон кривой 3 равен  $3 \cdot 10^{-10} \text{см}^2$ , а расчет дает  $\beta \approx 3,1 \cdot 10^{-10} \text{см}^2$ . На линейном участке экспериментальные зависимости описываются соотношением:

$$\tau_{\delta}^{-1} = \beta(g + \tau^{-1}\beta^{-1}). \quad (6)$$

При  $g \gg \tau^{-1}\beta^{-1}$  (6) совпадает с (5). Из (2) (6) получим для темпа стационарной рекомбинации

$$R = \beta^{-1}\tau^{-1} [\exp(\beta\Delta n) - 1]. \quad (7)$$

Отклонение экспериментальных зависимостей  $\tau_{\delta}^{-1}(g)$  от линейных (6) для кривых 1 и 2 наблюдается при  $g \approx 1,2 \cdot 10^{13} \text{см}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Согласно (7), (3), такой темп фотогенерации соответствует  $|\Delta y_s| \approx 2,3 - 4,5$ .

Таким образом, в настоящей работе на основе анализа дифференциальной рекомбинационной характеристики (2) показано, что темп нелинейной рекомбинации в МДП структурах может экспоненциально зависеть от полного избытка неравновесных носителей (7). Диапазон изменения  $g$ , в котором имеют место соотношения (6), (7), определяется неравенством  $-\Delta y_s \ll 2y_s$ . В случае кривых 1 и 2 данный диапазон простирается до  $g \approx 1,2 \cdot 10^{13} \text{см}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Причина возникновения такой "экспоненциальной" нелинейности в МДП структурах состоит в уменьшении поверхностного потенциального барьера с ростом  $g$ . Следует обратить внимание на то, что при темпе фотогенерации  $g = \beta^{-1}\tau^{-1} \approx 1,4 \cdot 10^{12} \text{см}^{-2} \text{s}^{-1}$  (кривая 1), соответствующем нелинейной рекомбинации, величина  $\Delta n$  порядка  $2 \cdot 10^{11} \text{см}^{-3}$ , что гораздо меньше концентрации основных носителей, равной  $10^{15} \text{см}^{-3}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Саченко А.В., Снитко О.В. Фотоэффекты в приповерхностных слоях полупроводников. Киев, Наукова думка, 1984.
2. Овсяк В.Н. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. Новосибирск, Наука, 1984.
3. Камієнієскі Е. J. Vac. Sci. and Technol., 20, 811 (1982).
4. Пунда Д.И., Шубин В.Э. Препринт ФИАН № 204, М., 1986.

Поступила в редакцию 20 апреля 1988 г.