

©1994 г.

ПЕРЕЗАРЯДКА ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ НАКОПЛЕННЫМИ ПРИ ИНЖЕКЦИИ НЕОСНОВНЫМИ НОСИТЕЛЯМИ ТОКА

А.А.Лебедев

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 19 апреля 1994 г. Принята к печати 10 мая 1994 г.)

Рассмотрено влияние накопленных в базе диода неосновных носителей тока при инжекции из $p-n$ -перехода на степень заполнения глубоких уровней в слое объемного заряда при переключении напряжения на диоде с прямого на обратное. Показано, что при времени жизни $\tau \gtrsim 1$ мкс и плотности прямого тока $J_f \gtrsim 10$ А/см² дополнительная перезарядка центров, ответственных за глубокие уровни, может быть значительной и привести к ошибке в интерпретации результатов эксперимента.

Для исследования параметров глубоких уровней (ГУ) в полупроводниках широкое распространение получили методы емкостной спектроскопии [1-5]. Одним из распространенных способов стартовой перезарядки ГУ неосновными носителями тока является инжекция из $p-n$ -перехода. При этом обычно учитывается только стационарное заполнение ГУ в базе диода при протекании прямого тока. В данной работе сделана оценка влияния экстракции неосновных носителей заряда на заполнение ГУ в слое объемного заряда (СОЗ) при переключении напряжения на диоде с прямого на обратное. Перезарядка ГУ при экстракции носителей заряда может сказаться на интерпретации результатов емкостных измерений.

Для определенности рассмотрим диод с резким p^+-n -переходом и базой толщиной d . Будем считать, что основные параметры материала (время жизни τ и коэффициент диффузии D носителей тока, а также другие параметры) одинаковы во всем объеме базы. Тогда стационарное заполнение ГУ при инжекции описывается формулой

$$m_{st}/M = \alpha_n[n_0 + \Delta n(x)] / \{\alpha_n[n_0 + \Delta n(x)] + \alpha_p \Delta p(x)\}. \quad (1)$$

Здесь M , m_{st} — полная концентрация ГУ и концентрация электронов на них соответственно; x — расстояние от p^+-n -перехода; $\Delta n(x) = \Delta p(x)$ — концентрации неравновесных электронов и дырок; n_0 — равновесная концентрация электронов; $\alpha_n = \sigma_n v_e$, $\alpha_p = \sigma_p v_h$ — темп захвата электронов и дырок на ГУ; σ_n , σ_p , v_e , v_h — сечения захвата и тепловые скорости электронов и дырок соответственно. Формула (1) является основой для определения отношения σ_n/σ_p и длины диффузионного смещения $L_D = \sqrt{D\tau}$ в базе диода.

Плотность прямого тока J_f и распределение в базе инжектированных дырок в предельных случаях диодов с «толстой» ($d > L_D$) и «тонкой» ($d \ll L_D$) базой равны соответственно [6]

$$J_f = qD\Delta p_0/L_D, \quad \Delta p(x) = \Delta p_0 \exp(-x/L_D),$$

$$J_f = qD\Delta p_0/d, \quad \Delta p(x) = \Delta p_0(1 - x/d).$$

Здесь q — заряд электрона, Δp_0 — концентрация дырок на границе p - n -перехода. Накопленный (на единицу площади) заряд дырок при инжекции в диоде с толстой базой равен

$$Q = \int_0^{\infty} q\Delta p_0 \exp(-x/L_D) dx = q\Delta p_0 L_D = J_f L_D^2/D = J_f \tau,$$

для диода с тонкой базой равен

$$Q = \int_0^d q\Delta p_0(1 - x/d) dx = q\Delta p_0 d/2 = J_f d^2/2D = J_f \tau d^2/2L_D^2.$$

Если переключение напряжения с прямого на обратное происходит мгновенно и обратный ток через диод не ограничен сопротивлением источника, то есть этот заряд протекает через СОЗ, плотность обратного тока равна

$$J(t) = q\bar{p}v_E,$$

где \bar{p} — средняя концентрация дырок в СОЗ, v_E — дрейфовая скорость дырок. Здесь предполагается, что в большей части СОЗ электрическое поле велико и v_E приблизительно равно насыщенной скорости дрейфа [6].

Перезарядка ГУ обратным током дырок в СОЗ при низкой температуре, когда можно пренебречь тепловой генерацией дырок, определяется уравнением

$$dm/dt = -v_h \sigma_p \bar{p} m = -v_h \sigma_p J(t)/qv_E.$$

Расчетные значения m/m_{st} для толстого диода в некоторых частных случаях

τ, c	$J_f, A/cm^2$		
	1	10	100
$\sigma_p = 10^{-14} \text{ см}^2$			
10^{-8}	0.999	0.994	0.939
10^{-6}	0.939	0.535	$9 \cdot 10^{-4}$
10^{-4}	$1.9 \cdot 10^{-3}$	0	0
$\sigma_p = 10^{-15} \text{ см}^2$			
10^{-8}	1	0.999	0.994
10^{-6}	0.994	0.939	0.535
10^{-4}	0.535	$9 \cdot 10^{-4}$	0

Его решение имеет вид

$$\int_0^{\infty} dm/m = (v_h \sigma_p / qv_E) \int_0^{\infty} \mathcal{J}(t) dt.$$

Интеграл в правой части в предельном случае равен накопленному в базе заряду дырок. Тогда заполнение ГУ электронами после окончания процесса экстракции дырок для диода с толстой базой равно

$$m = m_{st} \exp(-v_h \sigma_p Q / qv_E) = m_{st} \exp(-v_h \sigma_p \tau \mathcal{J}_f / qv_E), \quad (2a)$$

для диода с тонкой базой равно

$$m = m_{st} \exp(-v_h \sigma_p Q / qv_E) = m_{st} \exp(-v_h \sigma_p \tau d^2 \mathcal{J}_f / 2qv_E L_D^2). \quad (2б)$$

Следует отметить, что изменение степени заполнения ГУ в СОЗ в результате захвата дырок при экстракции накопленного заряда зависит от x : в первый момент после переключения напряжения ширина СОЗ минимальна, а ток экстракции максимальный. С течением времени СОЗ расширяется и одновременно уменьшается обратный ток. Таким образом, распределение захваченных на ГУ дырок может значительно отличаться от того, которое было при протекании прямого тока.

Оценим вклад накопленного при инжекции заряда в заполнение ГУ в диоде с толстой базой для некоторых частных случаев. Результаты расчета по формуле (2a) приведены в таблице. При расчете предполагалось, что $v_h \approx v_E$. Из таблицы видно, что при $\tau \gtrsim 1$ мкс и $\mathcal{J}_f \gtrsim 10$ А/см² перезарядка ГУ, связанная с экстракцией дырок, может существенно изменить стационарное заполнение ГУ, а при $\tau \gtrsim 100$ мкс ГУ может практически полностью освободиться от электронов. В тонких диодах экстракция неосновных носителей тока меньше влияет на заполнение ГУ из-за множителя $d^2/2L_D^2$ в показателе экспоненты в формуле (2б).

Таким образом, дополнительная перезарядка ГУ при экстракции инжектированных неосновных носителей тока зависит от конкретных свойств диода и может изменяться в широких пределах в зависимости от условий измерения. В некоторых случаях вид стационарного заполнения ГУ, определяемый формулой (1), может значительно измениться, что приведет к заметной ошибке в оценке σ_n/σ_p и L_D .

Список литературы

- [1] С.Т. Сах. Sol. St. Electron., **19**, 975 (1976).
- [2] G.L. Miller, D.V. Lang, L.C. Kimerling. Ann. Rev. Mater. Sci., **7**, 377 (1977).
- [3] V. Lang. J. Appl. Phys., **45**, 3023 (1974).
- [4] Л.С. Берман, А.А. Лебедев. *Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках* (Л., Наука, 1981).
- [5] А.А. Лебедев. В сб.: *Методы диагностики точечных дефектов в полупроводниках и приборных структурах на их основе* (Наманган, 1990) с. 17.
- [6] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Энергия, 1974).

Редактор Т.А. Полянская