

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Докт. техн. наук, проф. СЫЧИК В. А.,
инженеры УЛАСЮК Н. Н., ШУМИЛО В. С.

Белорусский национальный технический университет

Для анализа первичных измерительных преобразователей (ПИП) на дискретных компонентах используем электрические модели. Дискретные компоненты измерительных преобразователей (ИП) характеризуются системой электрических параметров, которые можно определить из электрических измерений токов и напряжений на их выводах. Эти модели [1, 2], содержащие наряду с резисторами, источниками токов и реактивные полупроводниковые элементы, позволяют свести анализ переходных характеристик сложных структур ИП к решению алгебраических уравнений.

Используем электрическую модель диодного элемента ИП (рис. 1а), включающую параллельно соединенные источник тока и пассивные элементы C_d , R_d и описываемую уравнением, в котором ток диода состоит из рекомбинационного I_{dr} и тока I_{Rd} , отражающего накопление заряда в базе, а также через барьерную емкость I_{Cd} , т. е.

$$I_d = I_{dr} + I_{Cd} + I_{Rd}. \quad (1)$$

Значения входящих в (1) токов находим из выражений:

$$I_{dr} = eSL_n n_{p0} / \tau_n (\exp(U_d / \phi_T) - 1) = I_0 (\exp(eU_d / kT) - 1); \quad (2)$$

$$I_{Cd} = (eSL_n n_{p0} / \phi_T (\exp(U_d / \phi_T) - 1) + C_b) dU_d / dt; \quad (3)$$

$$I_{Rd} = U_d / R_d. \quad (4)$$

С учетом (1)...(4) электрическую модель диодного компонента ИП описываем следующим уравнением:

$$I_d(t) = I_0 (\exp(U_d / \phi_T) - 1) + (C_d + C_b) dU_d / dt, \quad (5)$$

где $I_0 = eSL_n n_{p0} / \tau_n$; $C_d = I_0 \tau_n / \phi_T (\exp(U_d / \phi_T) - 1)$; C_d , C_b – диффузионная и барьерная емкости p - n перехода; S – площадь поперечного сечения кристалла; n_{p0} – концентрация неосновных носителей заряда; L_n , τ_n – диффузионная длина и время жизни электронов; ϕ_T – тепловой потенциал; U_d – внешнее напряжение; R_d – сопротивление базового слоя.

Используемая электрическая модель биполярной триодной структуры ИП представлена на рис. 1б и содержит зависимые источники диффузионного тока I_d и рекомбинационных токов I_{CN} , I_{CI} , а также емкостей C_{d3} и C_{dk} , которые отображают накопление носителей, инжектированных соответственно из эмиттерной и коллекторной областей.

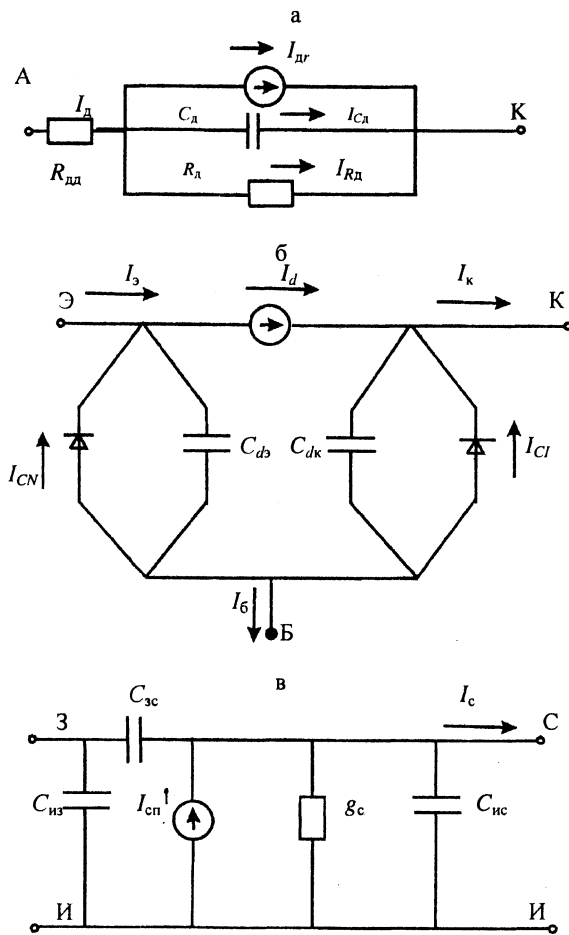


Рис. 1. Электрические модели полупроводниковых приборных структур ИП: а – модель диодного элемента; б – электрическая модель биполярной триодной структуры; в – модель униполярной триодной структуры ИП

Заметим, что $I_d = I_N - I_I$, где I_N обусловлен диффузией в базе носителей, инжектированных из эмиттера, а I_I – диффузией носителей, инжектированных из коллектора. Эти токи, выражаемые через электрофизические параметры областей элемента, находим из (3), (4):

$$I_N = eS_3 W_6 n_{p0} / 2\tau_n (\exp(U_3 / \varphi_T) - 1) = I_{SN} (\exp(U_3 / \varphi_T) - 1); \quad (6)$$

$$I_I = eS_K W_6 n_{p0} / 2\tau_i (\exp(U_K / \varphi_T) - 1) = I_{SI} (\exp(U_K / \varphi_T) - 1). \quad (7)$$

Обычно $\tau_n \approx \tau_i$ и $S_3 \approx S_K$, тогда

$$I_{SN} = I_{SI} = I_S = eSW_6 n_{p0} / 2\tau_n.$$

Здесь W_6 – толщина базовой области.

Аналогично определяем источники рекомбинационных токов:

$$I_{CN} = I_N / (\tau_{6n} / \tau_n) = I_N / B_N; \quad i_{CI} = I_I / (\tau_{6i} / \tau_i) = I_I / B_I, \quad (8)$$

где $B_N = \tau_{6n} / \tau_n$; $B_I = \tau_{6i} / \tau_i$; τ_{6n} , τ_{6i} – время жизни неосновных носителей, инжектированных из эмиттерной и коллекторной областей.

Емкости электрической модели:

$$C_{d3} = \tau_n / \varphi_T (I_N + I_S); \quad C_{dк} = \tau_i / \varphi_T (I_I + I_S). \quad (9)$$

На основе (6)...(9) параметры электрической модели триодного биполярного элемента ИП рассчитываем с помощью следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} I_3 &= I_N - I_I + I_N / B_N + C_3 dU_3 / dt; \\ I_к &= I_I - I_N + I_I / B_I + C_к dU_к / dt; \\ I_6 &= -(I_3 + I_к); \end{aligned} \quad (10)$$

$$I_N = I_S (\exp(U_3 / \varphi_T) - 1); \quad I_I = I_S (\exp(U_к / \varphi_T) - 1).$$

Электрическая модель униполярной триодной структуры ИП (рис. 1в) включает емкости $C_{из}$, $C_{ис}$, $C_{зс}$, проводимость канала g_c и источник тока $I_{сп} = g_3 U_3$.

Малосигнальный полный статический ток электрической модели определяется выражением [1]

$$I_c = g_3 U_3 + g_c U_c + g_U U_U,$$

где $g_3 = dI_c / dU_3$; $g_c = dI_c / dU_c$; $g_U = dI_c / dU_U$; U_3 , U_c , U_U , $U_{п}$ – напряжения на затворе, стоке, истоке и подложке соответственно.

Основные уравнения для расчета параметров электрической модели МДП – структур ПИП – приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Расчетная формула
Пороговое напряжение	$U_T = \varphi_{мп} - \varphi - Q_{3п} / C_{3п} - Q_n / C_{3п}$
Заряд в обедненной области канала	$Q_n = \pm (\pm 2E_d e N (U + \varphi_B))^{1/2}$
Выходной ток в крутой области ВАХ	$I_q = \mu C_{3п} W l ((U_3 - \varphi_{мп} + \varphi_B + Q_{3п} / C_{3п})(U_c - U_3) - 1/2(U_c^2 - U_U^2) - 2(2E_d e N)^{1/2} / 3C_{3п}) ((U_c + \varphi_B)^{3/2} - (U_{п} + \varphi_B)^{3/2})$
Выходной ток при заземленном истоке	$I_c = \mu C_{3п} W l ((U_3 - U_T) U_c - 1/2 U_c^2)$
Напряжение насыщения тока стока (пороговая область ВАХ)	$U_{сн} = U_3 - U_T$
Удельная крутизна	$S = \mu E_d W / 2 d_i l$
Выходной ток в пороговой области	$I_c = 1/2 \mu C_{3п} W l (U_3 - U_T)^2$

В приведенных выражениях:

U_T – пороговое напряжение затвора; Q_n – объемный заряд в объединенной области; $Q_{зп}$ – эффективный заряд в окисле и на поверхности раздела; $\Phi_{мп}$ – работа выхода электронов из металла в полупроводник; Φ_B – потенциал изгиба зон в начале инверсии; μ – эффективная поверхностная подвижность; N – концентрация легирующей примеси в подложке; l, W – длина и ширина канала; $C_{зп}$ – емкость области затвор – подложка; E_d, d_d – диэлектрическая проницаемость и толщина затворного слоя диэлектрика.

На основании уравнений (1)...(5) электрической модели диодного компонента ИП были определены электрофизические параметры гетеродиодной $pGe-nGaAs$ структуры с площадью $p-n$ перехода $S = 1 \text{ мм}^2$: толщина эмиттерного $n-GaAs$ слоя $d_3 = 0,358 \text{ мкм}$; толщина базовой $p-Ge$ области $d_6 = 0,98 \text{ мкм}$; концентрация основных носителей соответственно n - и p -областей $n_3 = 4,3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и $p_6 = 5,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; барьерная емкость гетероструктуры $C_6 = 13,6 \text{ пФ}$.

Таким образом, для расчета статических и динамических характеристик ПИП на дискретных полупроводниковых компонентах используем уравнения (1)...(10) электрической модели биполярных элементов и уравнения табл. 1 модели униполярных элементов ПИП.

ВЫВОДЫ

1. Диодная и триодная полупроводниковые приборные структуры измерительных преобразователей представлены электрическими моделями, включающими источники тока, емкости переходов и элементы проводимости.
2. Представлены базовые выражения для расчета параметров электрической модели активных компонентов первичных измерительных преобразователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. С ы ч и к В. А. Измерительные преобразователи излучений на основе полупроводниковых приборных структур. – Мн.: Выш. шк., 1991. – 179 с.
2. Б у б е н н и к о в А. Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. – М.: Высш. шк., 1989. – 320 с.

Представлена НИЛ
сетевых информационных технологий

Поступила 1.07.2002