

## 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;  $L_n$ ,  $\tau_n$  – диффузионная длина и время жизни электронов;  $\phi_T$  – 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.

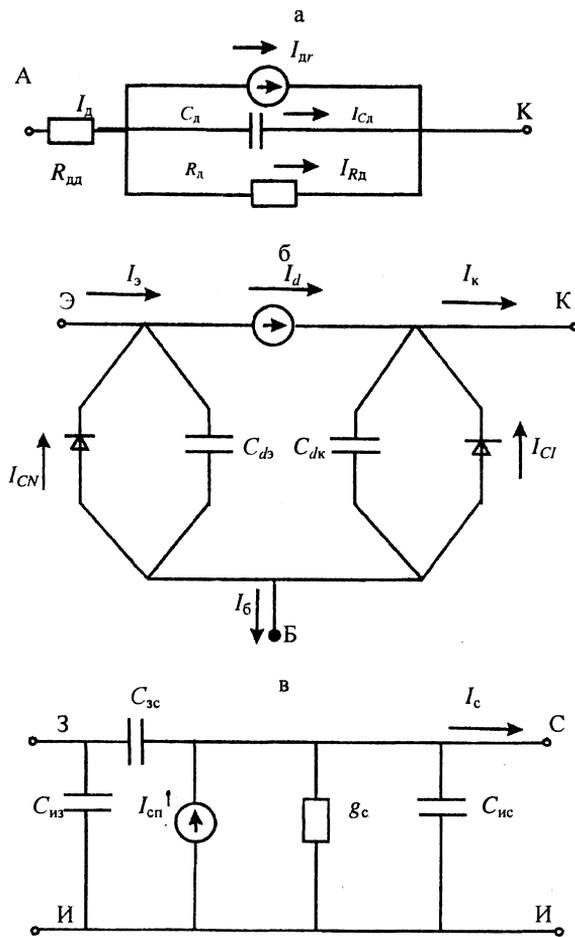


Рис. 1. Электрические модели полупроводниковых приборных структур ИП: а – модель диодного элемента; б – электрическая модель биполярной триодной структуры; в – модель униполярной триодной структуры ИП

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  $B_N = \tau_{6n} / \tau_n$ ;  $B_I = \tau_{6i} / \tau_i$ ;  $\tau_{6n}$ ,  $\tau_{6i}$  – 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;  $\Phi_B$  – потенциал изгиба зон в начале инверсии;  $\mu$  – 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