

УДК 621.382.3

## Компьютерное моделирование неизотермического токораспределения в симметричных биполярных транзисторных структурах с дефектами

В.А.Сергеев, О.А.Дулов, А.А.Куликов

Ульяновский государственный технический университет  
Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Расчет неизотермического токораспределения в приборных структурах с дефектами представляет сложную задачу, которая решается только численными методами [1]. Для биполярных транзисторов (БТ) с симметричной геометрией активной области структуры [2, 3] удается получить простые формулы для оценки влияния дефектов на неоднородность тока и температуры. Теплоэлектрическая модель таких БТ представляется в виде двух параллельно соединенных транзисторов (рис.1,а). Мощность, рассеиваемая  $i$ -м транзистором в активном режиме, определяется выражением  $P_i = U_K I_i$ , где коллекторное напряжение  $U_K$  полагается одинаковым для обоих транзисторов, а токи  $I_{1,2}$  через транзисторы являются функциями температуры:

$$I_i = (S_0 A_i / 2) \exp \left[ - (E_g - eU_{ЭБ} + e r_{ni} I_i) / k T_{ni} \right]. \quad (1)$$

Здесь  $S_0$  – полная площадь структуры;  $A_i$  – слабо зависящие от температуры параметры;  $U_{ЭБ}$  – напряжение между эмиттером и базой БТ;  $r_{ni} = r_{Эi} + r_{Би} / B_{CTi}$  – входное сопротивление  $i$ -го транзистора в схеме с общей базой (ОБ);  $E_g$  – ширина запрещенной зоны полупроводника;  $k$  – постоянная Больцмана;  $e$  – заряд электрона;  $B_{CTi}$  – коэффициент передачи тока в схеме ОЭ. Температуры переходов  $T_{ni}$  при заданной температуре корпуса  $T_K$  определяются тепловыми сопротивлениями частей структуры (рис.1,б):

$$\Delta T_{ni} \equiv T_{ni} - T_K = P_i R_{Ti} - (-1)^i R_{Ti} (R_{T2} P_2 - R_{T1} P_1) / (R_{T1} + R_{T2} + R_{Tcb}). \quad (2)$$

Дефектность прибора по аналогии с [1] можно свести к различию входных сопротивлений  $r_{ni}$ , тепловых сопротивлений  $R_{T_i}$  и инжекционных параметров  $A_i$  транзисторов. Для определенности бездефектным будем считать второй транзистор и обозначим  $R_{T_2} = R_{T_0}$ ;  $\Delta R_T = R_{T_1} - R_{T_0}$  и  $r_{n2} = r_{n0}$ ;  $\Delta r_n = r_{n1} - r_{n0}$ .

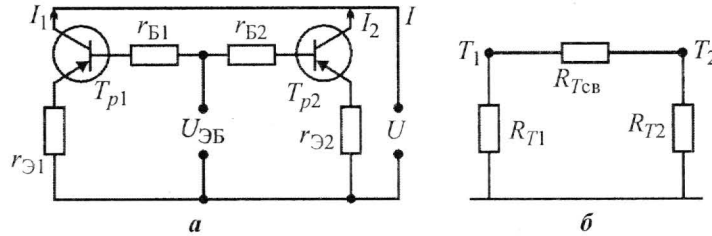


Рис. 1. Электрическая (а) и тепловая (б) модель биполярного транзистора с симметричной активной областью структуры [1]

При  $I_1 + I_2 = I_0 = \text{const}$  токи  $I_1$  и  $I_2$  можно выразить через их отклонение от среднего значения  $\delta = (I_1 - I_2)/I_0$ :  $I_1 = I_0(1 + \delta)/2$ ;  $I_2 = I_0(1 - \delta)/2$ . В случае малых дефектов выражения (2) в линейном приближении преобразуются к виду

$$\Delta T_{n1,2} = \Delta \bar{T} \pm \Delta \tilde{T}, \quad (3)$$

где  $\Delta \bar{T} = \Delta T_0(1 + \eta)$  – приращение средней температуры структуры;  $\Delta \tilde{T} = \Delta T_0(1 - 2a)(\delta + \eta)$  – отклонение температуры частей структуры от средней;  $\Delta T_0 = R_{T_0} U_K I_0 / 2$ ,  $\eta = \Delta R_T / 2 R_{T_0}$ . Параметр  $a = R_{T_0} / (R_{T_1} + R_{T_2} + R_{T_{св}})$  определяет степень тепловой связи между частями структуры: при слабой связи  $R_{T_{св}} \rightarrow \infty$  и  $a \rightarrow 0$ . Поскольку  $\Delta \tilde{T} \ll T_K$ , то выражения для токов (1) можно записать в виде

$$I_1 \equiv \frac{I_0}{2}(1 + \delta) \approx (S_0 A_1 / 2) \exp \left[ -\varepsilon - v_{n0} \delta - \Delta v_n + \varepsilon (\Delta \tilde{T} / T_K) \right]; \quad (4a)$$

$$I_2 \equiv \frac{I_0}{2}(1 - \delta) \approx (S_0 A_2 / 2) \exp \left[ -\varepsilon + v_{n0} \delta - \varepsilon (\Delta \tilde{T} / T_K) \right], \quad (4б)$$

где  $\varepsilon = v_{n0} + [(E_g / e) - U_{ЭБ}] / \phi_{\bar{T}}$ ;  $\phi_{\bar{T}} = k \bar{T}_n / e$  – температурный потенциал при средней температуре структуры  $\bar{T}_n = T_K + \Delta \bar{T}$ ;  $v_{n0} = r_{n0} I_0 / 2 \phi_{\bar{T}}$ ;  $\Delta v_n = \Delta r_n I_0 / 2 \phi_{\bar{T}}$ . Разделив (4a) на (4б), получим уравнение, связывающее величину разбаланса токов с параметрами структуры и дефектов:

$$\frac{(1 + \delta)}{(1 - \delta)} = \frac{A_1}{A_2} \exp \left[ \varepsilon (\Delta \tilde{T} / T_K) - 2 v_{n0} \delta - \Delta v_n \right]. \quad (5)$$

Логарифмируя обе части уравнения (5) и ограничиваясь линейным приближением, получим

$$\delta = \frac{\varepsilon I_0 U_K (1 - 2a) (\Delta R_T / 2) - \Delta v_n + \ln (A_1 / A_2)}{2 [1 - \varepsilon U_K I_0 (R_{T_0} / 2) (1 - 2a) + v_{n0}]}. \quad (6)$$

Из анализа (6) следует, что относительная величина разбаланса токов прямо пропорциональна величине дефекта и при  $\varepsilon I_0 U_K (1 - 2a) (R_{T_0} / 2) \ll 1$  практически линейно растет с увеличением коллекторного напряжения  $U_K$ .

Компьютерное моделирование неизотермического токораспределения в БТ с симметричной структурой проведено на основе схемы, приведенной на рис.1,а, с помощью программы Workbench, дополненной блоком расчета температуры переходов частей структуры. Алгоритм моделирования аналогичен описанному в [4] и состоит в расчете на каждом шаге итерационного цикла мощностей, рассеиваемых транзисторами, и температур их переходов, а затем – в нахождении токов  $I_1$  и  $I_2$ , протекающих через транзисторы, при этих значениях температуры. В начале расчета температуры обеих частей полагаются равными температуре корпуса; расчет заканчивается, когда новые расчетные значения токов  $I_1$  и  $I_2$  отличаются от предыдущих значений не более чем на 0,5%.

Расчетные зависимости разности токов от коллекторного напряжения для двух типов дефектов в виде различия сопротивлений в эмиттерной цепи и различия тепловых сопротивлений частей структуры представлены на рис.2. При этом крутизна этих зависимостей практически линейно растет с ростом величины дефектов (рис.3). Основные параметры режима и электрические параметры транзисторов соответствуют паспортным данным кремниевых транзисторов типа КТ803:  $B_{CT} = 20$ ,  $r_{Б1} = r_{Б2} = 1,0 \text{ Ом}$ ,  $r_{Э0} = 0,1 \text{ Ом}$ ,  $R_{T0} = 1,0 \text{ К/Вт}$ ,  $R_{Tсв} = \infty$ ,  $I_0 = 1,0 \text{ А}$ ,  $E_g = 1,2 \text{ эВ}$ ,  $U_{ЭБ} = 0,75 \text{ В}$ ,  $T_K = 300 \text{ К}$ .

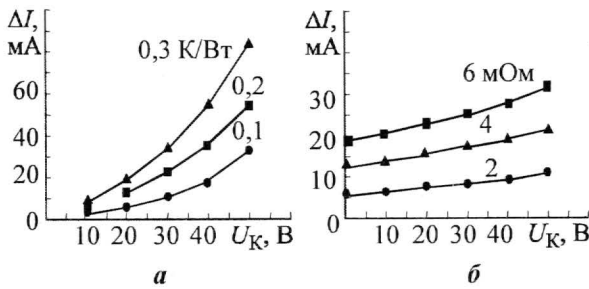


Рис.2. Зависимость разности токов через симметричные части структуры от  $U_K$  при заданной величине дефекта: а – разность тепловых сопротивлений  $\Delta R_T$ ; б – разность сопротивлений эмиттера  $\Delta r_Э$

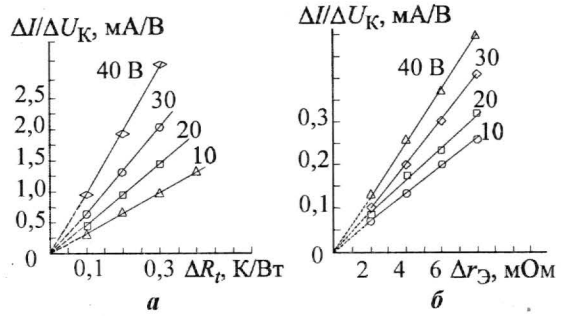


Рис.3. Зависимость крутизны характеристик  $\Delta I(U_K)$  от величины вносимого дефекта при заданном коллекторном напряжении  $U_K$ : а – разность тепловых сопротивлений  $\Delta R_T$ ; б – разность сопротивлений эмиттера  $\Delta r_Э$

Полученные соотношения позволяют рассчитать разности токов и температур между симметричными частями БТ, обусловленные технологическими дефектами. Результаты могут быть использованы для оценки погрешностей дифференциальных каскадов на БТ, а также при разработке средств контроля качества БТ методом сравнения [5].

### Литература

1. Кернер Б.С., Рубаха Е.А., Синкевич В.Ф. Анализ токораспределения в структурах мощных ВЧ и СВЧ транзисторов с неоднородностью // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1978. – Вып. 1. – С. 15–29.
2. Кузнецов Г.В., Белозерцев А.В. Поля температур поверхности кристалла мощного биполярного транзистора // Изв. вузов. Электроника. – 2007. – № 1. – С. 22–26.
3. Чаплыгин Ю.А., Галушков А.И., Семенов А.А. и др. Магнитотранзистор с регулируемыми характеристиками в низкоомном состоянии // Изв. вузов. Электроника. – 2004. – № 3. – С. 52–58.
4. Петросяц К.О., Мальцев П.П., Рябов Н.И., Харитонов И.А. Электротепловое проектирование мощных «интеллектуальных» интегральных схем // Изв. вузов. Электроника. – 1998. – № 3. – С. 73–82.
5. Сергеев В.А. Методы и средства измерения тепловых параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем // Электронная промышленность. – 2004. – № 1. – С. 45–48.

Поступило 7 февраля 2008 г.

**Сергеев Вячеслав Андреевич** – доктор технических наук, доцент, директор УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, заведующий базовой кафедрой радиотехники, опто- и наноэлектроники УлГТУ при УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. *Область научных интересов:* токораспределение и теплофизические процессы в твердотельных структурах, полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах; методы и средства измерения теплофизических параметров изделий электронной техники.

**Дулов Олег Александрович** – доцент кафедры радиотехники УлГТУ. *Область научных интересов:* методы и средства контроля качества полупроводниковых приборов и интегральных микросхем по шумовым и теплоэлектрическим характеристикам.

**Куликов Александр Александрович** – магистрант базовой кафедры радиотехники, опто- и наноэлектроники УлГТУ при УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. *Область научных интересов:* методы и средства контроля качества полупроводниковых приборов и интегральных микросхем по шумовым и теплофизическим характеристикам.