

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.315.592,519.688

### ДВУХСЕКЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ПОЛОСКОВЫХ СТРУКТУРАХ БИПОЛЯРНЫХ И ГЕТЕРОБИПОЛЯРНЫХ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ

© 2022 г. В. А. Сергеев<sup>a, b, \*</sup>, А. М. Ходаков<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
ул. Гончарова, 48/2, Ульяновск, 432011 Российская Федерация

<sup>b</sup>Ульяновский государственный технический университет,  
ул. Северный Венец, 32, Ульяновск, 432027 Российская Федерация

\*E-mail: sva@ulstu.ru

Поступила в редакцию 25.03.2022 г.

После доработки 25.03.2022 г.

Принята к публикации 25.04.2022 г.

Получено приближенное аналитическое выражение для плотности эмиттерного тока под дорожкой эмиттерной металлизации в полосковых структурах биполярных и гетробиполярных СВЧ-транзисторов в изотермическом приближении с учетом падения напряжения на распределенных сопротивлениях активной базы и токоведущей эмиттерной металлизации. Показано, что при раздельном учете указанных факторов неоднородного токораспределения положение линии средней плотности тока не зависит от полного тока и делит структуру на две неодинаковые части с плотностью тока больше и меньше среднего значения. Установлено, что при совместном учете факторов неоднородного токораспределения линии среднего тока представляют собой эллипсы, которые проходят через характерные точки, а фокусы эллипсов находятся в середине края эмиттерной дорожки. Предложено для расчета функциональных характеристик транзисторов и оценки их предельных возможностей использовать представление транзистора в виде двух параллельно соединенных транзисторов, токи через которые в общем случае неодинаковы и определяются факторами неоднородного токораспределения.

DOI: 10.31857/S0033849422110122

#### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наряду с активной разработкой СВЧ-транзисторов на основе структур металл–диэлектрик–проводник (МДП) и High Electron Mobility Transistor (HEMT) в современной аппаратуре радиосвязи и телекоммуникаций широко используются мощные биполярные, в том числе гетеропереходные, СВЧ-транзисторы [1–5]. Приборы этого класса являются наименее надежным в составе современных радиоэлектронных систем различного назначения, поскольку работают в наиболее жестких тепловых и электрических режимах. Для этого класса приборов характерно проявление эффектов неоднородного и неустойчивого распределения плотности тока, мощности и температуры в транзисторных структурах, которые приводят к локальным перегревам и термомеханическим напряжениям структуры и, как следствие, к ускорению механизмов деградации и отказам приборов.

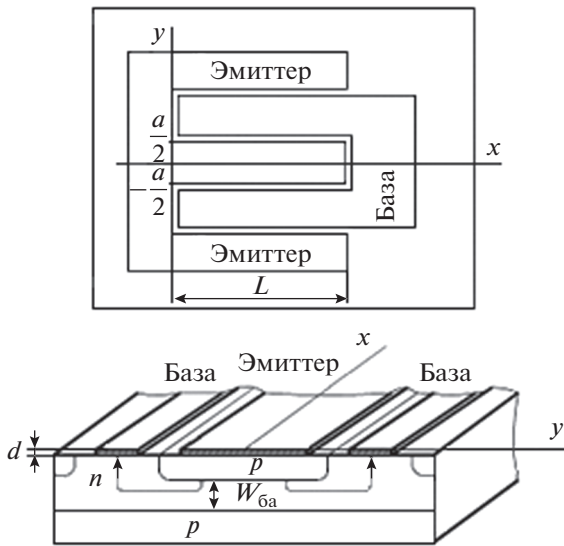
Неоднородное распределение плотности тока в структурах полупроводниковых приборов при-

водит к ограничению их функциональных возможностей и надежности. Наиболее опасно неоднородное токораспределение для приборных структур с внутренней положительной тепловой обратной связью, в частности для структур биполярных (БТ) и гетеробиполярных СВЧ-транзисторов (ГБТ).

Одной из наиболее распространенных геометрий структур современных мощных БТ и ГБТ является полосковая или гребенчатая геометрия (рис. 1), в том числе и с разделением эмиттерных дорожек на несколько частей.

Основными регулярными причинами неоднородного токораспределения в БТ с гребенчатой структурой является падение напряжения на сопротивлении активной области базы [6, 7] и токоведущей металлизации [8, 9].

В известных работах, посвященных анализу токораспределения в биполярных и гетеробиполярных транзисторных структурах, указанные причины рассматривались раздельно [10], либо вовсе не учитывались [11, 12]. Отдельные частные



**Рис. 1.** Геометрия “элементарного” транзистора полупроводниковой структуры биполярного СВЧ-транзистора;  $W_{ба}$  – толщина активной базы.

случаи действия указанных эффектов в гребенчатых структурах мощных БТ рассмотрены в наших работах [13–15]. В данной работе получены общие решения для распределения плотности тока под эмиттерной дорожкой металлизации в предположении, что падение напряжения на сопротивлении активной области базы и токоведущей металлизации не превышают температурного потенциала. Это условие обычно закладывается при проектировании транзисторных структур.

Кроме того, в данной работе указанные выше эффекты рассмотрены в изотермическом приближении, т.е. в предположении однородного распределения температуры по площади структуры. Такое приближение применимо с некоторой приемлемой погрешностью для структур с характерными размерами активной области (гребенки), не превышающими толщины кристалла, либо для импульсных режимов работы транзистора. Несмотря на указанные ограничения, это приближение может служить основой для последующего анализа токораспределения с учетом тепловых эффектов.

## 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЭМИТТЕРНОГО ТОКА ПОД ДОРОЖКОЙ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ОТТЕСНЕНИЯ

Эффект оттеснения эмиттерного тока к краям эмиттера, в результате падения напряжения на активном сопротивлении активной базы в БТ является давно известным и хорошо изученным эффектом. Разработчики мощных БТ и ГБТ учитывают этот эффект при проектировании транзисторных структур, так чтобы падение напряжения на

сопротивлении активной базы не превышало теплового потенциала [1, 2]. Но даже в этом случае (как будет показано ниже) данный эффект приводит к существенной неоднородности плотности тока.

Особенностью ГБТ является сильное легирование активной базы, что позволяет существенно уменьшать ее толщину для улучшения частотных свойств транзисторов [2, 3]. Однако повышение степени легирования с одновременным уменьшением толщины активной базы не дает существенного уменьшения сопротивления активной базы ГБТ, и поэтому эффект оттеснения эмиттерного тока в структурах ГБТ необходимо учитывать.

При рассмотрении эффекта оттеснения в гребенчатых структурах БТ и ГБТ с тонкой и сильно легированной базой обычно пренебрегают влиянием эффектов модуляции проводимости базы и зависимостью коэффициента передачи тока от плотности тока, и тогда при заданном токе эмиттера  $I_э$ , втекающем в дорожку, изменение плотности эмиттерного тока вдоль оси  $y$  (поперек дорожки) с учетом падения напряжения только на сопротивлении активной базы описывается выражением [7, 8]:

$$J_{эб}(\bar{y}) = \bar{J}_э \frac{D}{\text{tg} D \cos^2(D\bar{y})}, \quad (1)$$

где  $\bar{J}_э = I_э/La$  – средняя плотность тока,  $\bar{y} = 2y/a$ ,  $L$  и  $a$  – длина и ширина эмиттерной дорожки соответственно, а постоянная интегрирования  $D$  находится из уравнения, которое запишем в терминах работы [13]:

$$D \text{tg} D = \Phi_{ба} \bar{I}_э, \quad (2)$$

где  $\Phi_{ба} = R_{ба} I_{пред} (1 - \alpha) / 2\varphi_T$  – фактор неоднородности токораспределения;  $R_{ба} = a / 4\sigma_{ба} W_{ба} L$  – расчетное сопротивление половины активной базы;  $a$  – ширина эмиттерной дорожки, равная ширине базы;  $W_{ба}$  – толщина, а  $\sigma_{ба}$  – усредненная проводимость активной базы;  $\bar{I}_э = I_э / I_{пред}$ , а  $I_{пред}$  – предельный ток коллектора для данного типа транзистора;  $\alpha$  – коэффициент передачи тока транзистора в схеме с общей базой;  $\varphi_T = kT/q$  – температурный потенциал;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $q$  – заряд электрона.

В выражении для  $R_{ба} = a / 4\sigma_{ба} W_{ба} L$  учтено, что в силу симметрии геометрии элементарного транзистора (см. рис. 1) ток базы  $I_б = (1 - \alpha)I_э$  симметрично распределяется между правой и левой частями структуры.

Если падение напряжения на сопротивлении активной базы не превышает теплового потенциала [1, 7], то можно рассмотреть приближенное

решение уравнений (1), (2). При выполнении условия  $R_{\text{ба}} I_6 < \varphi_T$ , раскладывая в (1) и (2)  $\text{tg} D$  и  $\cos^2(D\bar{y})$  в ряд и сохраняя в разложении только члены до третьей степени по  $D$  включительно, получим

$$J_{\text{эб}}(\bar{y}) \approx \bar{J}_3 \left[ 1 + \Phi_{\text{ба}}(\bar{y}^2 - 1/3) \right]. \quad (3)$$

Координаты точек  $p$ - $n$ -перехода, в которых плотность эмиттерного тока равна среднему значению, легко находятся из (3):

$$\hat{y} = \pm (1/2\sqrt{3})a \approx \pm 0.29a$$

и не зависят от полного тока. То есть при изменении полного эмиттерного тока он просто перераспределяется между двумя частями эмиттерной дорожки металлизации, разделенными линиями  $\hat{y} = \pm (1/2\sqrt{3})a$  (рис. 2). Максимальная плотность тока

$$J_{\text{эб}}^{\text{max}}(\bar{y}) \approx \bar{J}_3 \left[ 1 + \frac{2}{3} \Phi_{\text{ба}} \right]$$

будет под краями эмиттерной дорожки при  $y = \pm a/2$ , а минимальная

$$J_{\text{эб}}^{\text{min}}(\bar{y}) \approx \bar{J}_3 \left[ 1 - \frac{1}{3} \Phi_{\text{ба}} \right]$$

– при  $y = 0$ , а их отношение

$$K_6 = J_{\text{эб}}^{\text{max}}(0) / J_{\text{эб}}^{\text{min}}(L) = \frac{3 + 2\Phi_{\text{ба}}}{3 - \Phi_{\text{ба}}} = 1 + \frac{3\Phi_{\text{ба}}}{3 - \Phi_{\text{ба}}}$$

не зависит от полного тока, втекающего в дорожку.

Площадь первой части дорожки  $S_{16}$  с плотностью тока, превышающей среднее значение, очевидно равно

$$S_{16} = aL/\sqrt{3} = S_0/\sqrt{3},$$

а площадь второй части, плотность тока которой меньше среднего значения, соответственно равна

$$S_{26} = aL(1 - 1/\sqrt{3}) = S_0(1 - 1/\sqrt{3}).$$

Полные токи, протекающие через каждую из частей, нетрудно получить интегрированием (3) по  $\bar{y}$  в пределах соответствующих частей токовой дорожки:  $I_1^6 \Rightarrow \{\hat{y}; \pm a/2\}$  и  $I_2^6 \Rightarrow \{0; \hat{y}\}$ :

$$I_1^6 = 2 \int_0^{1/\sqrt{3}} J_3(\bar{y}) d\bar{y} = \frac{I_3}{\sqrt{3}} \left( \sqrt{3} - 1 + \frac{\Phi_{\text{ба}}}{9} \right); \quad (4a)$$

$$I_2^6 = 2 \int_{1/\sqrt{3}}^1 J_3(\bar{y}) d\bar{y} = \frac{I_3}{\sqrt{3}} \left( 1 - \frac{\Phi_{\text{ба}}}{9} \right). \quad (4б)$$

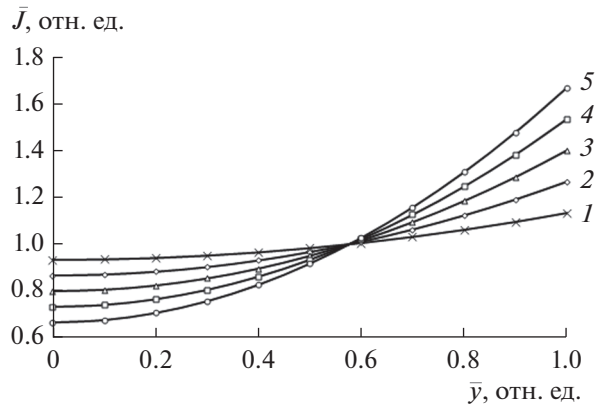


Рис. 2. Распределение плотности тока поперек эмиттерной дорожки в результате эффекта отсечения эмиттерного тока к краям эмиттера:  $\Phi_{\text{ба}} = 0.2$  (1), 0.4 (2), 0.6 (3), 0.8 (4) и 1.0 (5).

### 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЭМИТТЕРНОГО ТОКА С УЧЕТОМ ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

При преобладающем действии эффекта падения напряжения на сопротивлении металлизации распределение плотности тока вдоль дорожки описывается выражением, аналогичным (1) [8, 9]:

$$J_{\text{эм}}(\bar{x}) = \bar{J}_3 \frac{C}{\text{tg} C \cos^2 [C(1 - \bar{x})]}, \quad (5)$$

где  $\bar{x} = x/L$ , а постоянную интегрирования  $C$  находим из уравнения [13]

$$C \text{tg} C = \Phi_{\text{эм}} \bar{J}_3, \quad (6)$$

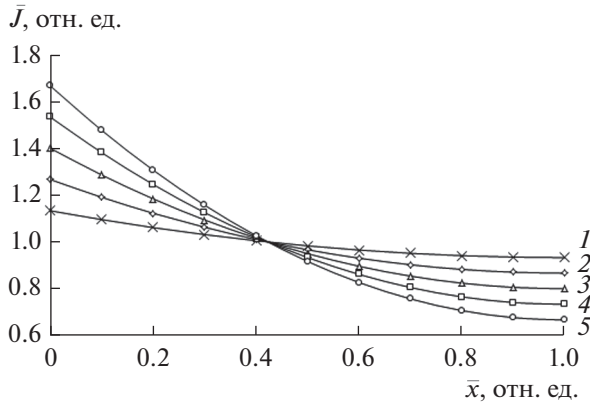
где  $\Phi_{\text{эм}} = R_{\text{эм}} I_{\text{пред}} / 2\varphi_T$  – фактор неоднородности токораспределения, обусловленный сопротивлением металлизации;  $R_{\text{эм}} = \rho_{\text{мет}} L / ad$  – полное сопротивление,  $\rho_{\text{мет}}$  – удельное сопротивление материала металлизации, а  $d$  – толщина эмиттерной дорожки металлизации.

При выполнении условия  $\Phi_{\text{эм}} \leq 1$ , раскладывая в (5) и (6)  $\text{tg} C$  и  $\cos^2 [C(1 - \bar{x})]$  в ряд и сохраняя в разложении только члены до третьей степени по  $C$  включительно, с погрешностью не более  $(\Phi_{\text{эм}}/3)^2$  для распределения плотности тока под дорожкой получим

$$J_{\text{эм}}(\bar{x}) \approx \bar{J}_3 \left\{ 1 + \Phi_{\text{эм}} \left[ (\bar{x} - 1)^2 - \frac{1}{3} \right] \right\}. \quad (7)$$

Плотность эмиттерного тока, очевидно, будет максимальна под основанием эмиттерной дорожки при  $x = 0$  и равна

$$J_{\text{эм}}^{\text{max}}(\bar{x}) \approx \bar{J}_3 \left\{ 1 + \frac{2}{3} \Phi_{\text{эм}} \right\},$$



**Рис. 3.** Распределение плотности эмиттерного тока вдоль эмиттерной дорожки в результате падения напряжения на ее сопротивлении:  $\Phi_{ба} = 0.2$  (1), 0.4 (2), 0.6 (3), 0.8 (4) и 1.0 (5).

и минимальна, соответственно, под концом дорожки при  $x = L$ :

$$J_{эм}^{min}(\bar{x}) \approx \bar{J}_э \left\{ 1 - \frac{1}{3} \Phi_{эм} \right\}.$$

Отношение максимальной плотности эмиттерного тока к минимальной в этом случае определяется выражением

$$K_M = J_{эм}^{max}(0) / J_{эм}^{min}(L) = \frac{3 + 2\Phi_{эм}}{3 - \Phi_{эм}} = 1 + \frac{3\Phi_{эм}}{3 - \Phi_{эм}}$$

и не зависит от полного тока, втекающего в дорожку.

Приравнивая выражение в квадратных скобках в (7) к 0, найдем координаты  $\hat{x}$  точек  $p$ - $n$ -перехода, в которых плотность тока равна среднему значению:  $\hat{x} = [1 - (1/\sqrt{3})]L = 0.42L$ . Координаты  $\hat{x}$  не зависят от полного тока, втекающего в эмиттерную дорожку, и полный ток распределяется между двумя частями “элементарного” транзистора, разделенными линией  $\hat{x} = 0.42L$  (рис. 3).

Площадь  $S_{1M}$  части дорожки с плотностью эмиттерного тока, превышающей среднее значение, в этом случае будет равно

$$S_{1M} = aL(1 - 1/\sqrt{3}) = S_0(1 - 1/\sqrt{3}),$$

а площадь остальной части дорожки, где плотность эмиттерного тока меньше среднего значения, равна

$$S_{2M} = S_0/\sqrt{3}.$$

Полные токи, протекающие через каждую из частей, нетрудно получить интегрированием (7)

по соответствующим частям токоведущей дорожки:  $I_1^M \Rightarrow \{0; \hat{x}\}$  и  $I_2^M \Rightarrow \{\hat{x}; L\}$ :

$$I_1^M = \frac{I_э}{\sqrt{3}} \left( \sqrt{3} - 1 + \frac{\Phi_{эм}}{9} \right); \quad I_2^M = \frac{I_э}{\sqrt{3}} \left( 1 - \frac{\Phi_{эм}}{9} \right). \quad (8)$$

Формулы (4) и (8) одинаковы по виду, поскольку физический механизм неоднородного токораспределения одинаков.

#### 4. СОВМЕСТНЫЙ УЧЕТ ФАКТОРОВ НЕОДНОРОДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЭМИТТЕРНОГО ТОКА ПОД ДОРОЖКОЙ

В гребенчатых структурах БТ с длинными и широкими дорожками необходимо учитывать обе регулярные причины неоднородного токораспределения. Для этого по аналогии с работой [16] объединим решения (3) и (7) и, пренебрегая членами второго порядка малости, запишем выражение для плотности эмиттерного тока  $J_{эмб}(x, y)$  при совместном учете падения напряжения на сопротивлении металлизации и сопротивлении активной базы в виде

$$J_{эмб}(x, y) \approx \bar{J}_э \left\{ 1 + \Phi_{эм} \left[ (\bar{x} - 1)^2 - (1/3) \right] + \Phi_{ба} \left( \bar{y}^2 - (1/3) \right) \right\}. \quad (9)$$

В этом случае плотность эмиттерного тока будет максимальна под краями эмиттерной дорожки у ее основания, т.е. при  $x = 0$  и  $y = \pm a/2$ :

$$J_{эмб}^{max}(0, \pm a/2) \approx \bar{J}_э \left\{ 1 + \frac{2}{3} (\Phi_{эм} + \Phi_{ба}) \right\}.$$

Соответственно, минимальное значение будет наблюдаться под центром эмиттерной дорожки на ее конце:

$$J_{эмб}^{min}(L, 0) \approx \bar{J}_э \left\{ 1 - \frac{1}{3} (\Phi_{эм} + \Phi_{ба}) \right\}.$$

Для нахождения координат точек эмиттерного перехода, в которых плотность тока равна среднему значению, приравняем выражение в фигурных скобках в (9) единице. Подставляя в (9) выражения для  $\Phi_{эм}$  и  $\Phi_{ба}$ , получим уравнение эллипса с центром в точке  $\{1, 0\}$ :

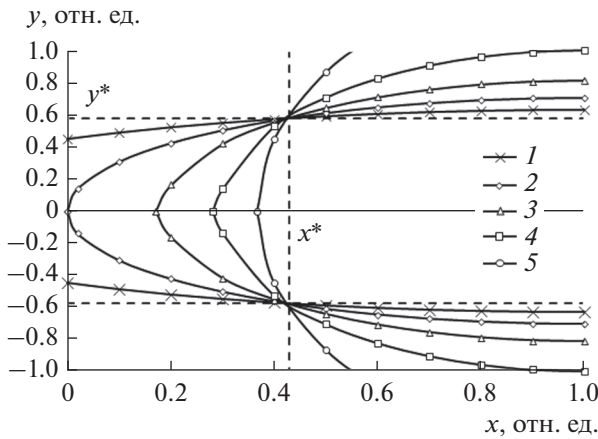
$$3\beta_{мб}(\bar{x} - 1)^2 + 3\bar{y}^2 = 1 + \beta_{мб}, \quad (10)$$

или в канонической форме

$$(\bar{x} - 1)^2 / a_{мб}^2 + \bar{y}^2 / b_{мб}^2 = 1, \quad (11)$$

где  $a_{мб}^2 = (1 + \beta_{мб}) / 3\beta_{мб}$ ;  $b_{мб}^2 = (1 + \beta_{мб}) / 3$ ;  $\beta_{мб} = 2R_{эм} / (1 - \alpha)R_{ба}$ .

Кривые, определяемые уравнением (10), делят эмиттерную дорожку металлизации транзистора



**Рис. 4.** Линии средней плотности эмиттерного тока, разделяющие эмиттерную дорожку на две части в результате совместного действия факторов неоднородного токораспределения:  $\beta_{мб} = 0.2$  (1), 0.5 (2), 1.0 (3), 2.0 (4) и 5.0 (5).

на две части (рис. 4), полные токи через которые можно найти интегрированием (9).

Вид кривой и характер неоднородности токораспределения определяется значением параметра  $\beta_{мб} = 2R_{эм}/(1-\alpha)R_{ба}$ . При  $2R_{эм}/(1-\alpha)R_{ба} \rightarrow 0$  характер токораспределения определяется только эффектом отнесения с линией среднего тока  $\bar{y}^* = 1/\sqrt{3}$ . При  $2R_{эм}/(1-\alpha)R_{ба} \rightarrow \infty$  характер неоднородности токораспределения определяется падением напряжения на сопротивлении дорожки металлизации с линией среднего тока  $\bar{x}^* = 1 - 1/\sqrt{3}$ . При промежуточных значениях  $2R_{эм}/(1-\alpha)R_{ба}$  все кривые раздела проходят через инвариантную точку с координатами  $\bar{y}^* = 1/\sqrt{3}$ ;  $\bar{x}^* = 1 - 1/\sqrt{3}$  (см. рис. 4).

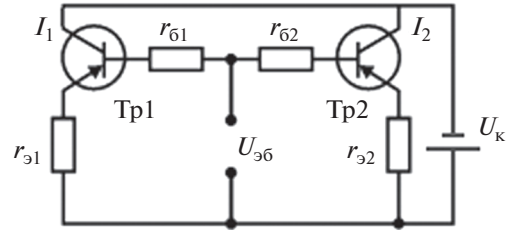
Получить общее выражение для площади частей дорожки с плотностью тока, превышающей среднее значение, при произвольном значении параметра  $\beta_{мб}$  не представляется возможным.

В случае, когда превалирует падение напряжения на сопротивлении дорожки металлизации при  $\beta_{мб} > 2$ , интегрирование уравнения (10) дает следующее выражение для  $S_{1м}$ :

$$S_{1м} = S_0 \times \left[ 1 - \frac{1}{2\sqrt{\beta_{мб}}} \left( \sqrt{\frac{\beta_{мб} - 2}{3}} + \frac{1 + \beta_{мб}}{3} \arcsin \sqrt{\frac{3}{1 + \beta_{мб}}} \right) \right] \quad (12)$$

В пределе при  $\beta_{мб} \rightarrow \infty$  выражение (12) сводится к ранее полученной формуле  $S_{1м} = S_0 (1 - 1/\sqrt{3})$ .

В структурах с короткими и широкими эмиттерными дорожками преобладающим является эффект отнесения эмиттерного тока к краям эмитте-



**Рис. 5.** Двухсекционная модель транзистора;  $U_k$  – коллекторное напряжение.

ра, что проявляется при  $\beta_{мб} < 0.5$ , для  $S_{1б}$  получим следующее выражение:

$$S_{1б} = S_0 \times \left[ \frac{\sqrt{\beta_{мб}}}{2} \left( \sqrt{\frac{1 - 2\beta_{мб}}{3\beta_{мб}}} + \frac{1 + \beta_{мб}}{3\beta_{мб}} \arcsin \sqrt{\frac{3\beta_{мб}}{1 + \beta_{мб}}} \right) \right], \quad (13)$$

которое в пределе при  $\beta_{мб} \rightarrow 0$  стремится к формуле, полученной выше,  $-S_{1б} = S_0/\sqrt{3}$ .

Принципиально важным является то, что площади, определяемые выражениями (12) и (13), не зависят от полного тока, втекающего в дорожку.

### 5. АНАЛИЗ ДВУХСЕКЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Факторы  $\Phi_{эм}$  и  $\Phi_{ба}$  неоднородного токораспределения в структуре “элементарного” транзистора БТ и ГБТ в предложенной модели определяются сопротивлениями активной базы и эмиттерной дорожки металлизации, а также значением предельного тока для данного типа транзисторов и не зависят от рабочего тока транзистора. Этот результат будет справедливым и для структур, содержащих  $N$  “элементарных” транзисторов. Таким образом, при анализе работы БТ и ГБТ в реальных схемах, для учета неоднородного распределения плотности тока в приборной структуре транзистор можно представить в виде двух параллельно соединенных транзисторов Tr1 и Tr2 с площадями активной области  $S_1$  и  $S_2$  ( $S_1 + S_2 = S_0$ ), независящими от полного рабочего тока транзистора (рис. 5). Значения сопротивлений пассивных областей базы  $r_{bi}$  и эмиттера  $r_{ei}$  транзисторов Tr1 и Tr2 в первом приближении можно считать обратно пропорциональными площадям:  $r_{b1}/r_{b2} \approx r_{e1}/r_{e2} \approx S_2/S_1$ .

Предельные возможности транзистора по току определяются максимальной плотностью тока в приборной структуре. Это значение плотности тока будет определять также и темп деградации скорости электродиффузии и электромиграции в элементах структуры при испытаниях и эксплуатации.

В результате положительной тепловой обратной связи неоднородность распределения тока в

транзисторной структуре будет возрастать. Анализ этих процессов представляет отдельную нетривиальную задачу, поскольку требует учета не только экспоненциальной зависимости плотности эмиттерного тока от температуры, но и температурных зависимостей параметров модели.

Отметим, что в выражения для факторов  $\Phi_{эм}$  и  $\Phi_{ба}$  неоднородного токораспределения входит температурный потенциал, что определяет их явную обратно пропорциональную зависимость от температуры. Диапазон рабочих температур электронных компонентов для специальных применений широкий: от  $-60$  до  $125^\circ\text{C}$ . При этом значения факторов неоднородного токораспределения при  $-60^\circ\text{C}$  практически в два раза больше, чем при  $125^\circ\text{C}$ , соответственно, будет возрастать и максимальная плотность тока в структуре приборов.

Все указанные выше эффекты и особенности необходимо учитывать при оценке предельных режимов и надежности БТ и ГБТ при их работе в реальных условиях эксплуатации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ токораспределения в гребенчатых структурах БТ и ГБТ в изотермическом приближении с учетом падения напряжения на распределенных сопротивлениях активной базы и дорожках токоведущей эмиттерной металлизации показал, что при раздельном учете указанных факторов положение линии средней плотности тока не зависит от полного тока. При совместном учете факторов неоднородного токораспределения линии среднего тока, разделяющего элементарный эмиттер на две части, представляют собой эллипсы, проходящие через характерные точки, фокусы которых расположены в середине края эмиттерной дорожки. Для расчета функциональных характеристик транзисторов и оценки их предельных возможностей предложено использовать двухсекционную модель токораспределения, согласно которой транзистор может быть представлен в виде двух параллельно соединенных частей плотность тока которых соответственно больше и меньше среднего значения. Полученные выражения позволяют более адекватно оценивать функциональные характеристики и предельные возможности БТ и ГБТ в реальных условиях эксплуатации.

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01134).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Колосницын Б.С.* Мощные СВЧ приборы. Минск: БГУИР, 2008.
2. *Liu W.* Handbook of III-V Hetero-Junction Bipolar Transistor. N. Y.: John Willy & Sons, 1998.
3. *Тимошенко В.П.* // Изв. вузов. Сер. Электроника. 2006. № 5. С. 19.
4. *Lachner R.* // 13th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. IEEE, 2013. P. 105.
5. *Козловский Э.Ю., Захаров С.И., Семенова Л.М., Тейдер А.А.* // Труды 31-й Междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". 2021. Вып. 3. С. 27.
6. *Hauser I.R.* // IEEE Trans. 1964. V. ED-11. № 5. С. 237.
7. Кремниевые планарные транзисторы. М.: Сов. радио, 1973.
8. *Caves K.J.S., Barnes J.A.* // IEEE Trans. 1965. V. ED-12. № 2. P. 84.
9. *Kisaki H.* // IEEE Trans. 1973. V. ED-20. № 4. P. 458.
10. *Chuang Ming-Yeh, Law M.E., O K.K.* // IEEE Trans. 1998. V. ED-45. № 9. P. 1993.
11. *Zhang C., Zhang J., Wang H. et al.* // 2015 IEEE Pulsed Power Conf. (PPC). Austin. 31 May–04 June 2015. 2015. P. 1.
12. *Lin C.-H., Su Y.-K., Juang Y.-Z. et al.* // IEEE Microwave and Wireless Components Lett. 2007. V. 17. № 1. P. 49.
13. *Сергеев В.А.* Контроль качества мощных биполярных транзисторов по теплоэлектрическим характеристикам. Ульяновск: УлГТУ, 2000.
14. *Сергеев В.А.* Синтез методов и средства неразрушающего контроля качества полупроводниковых изделий на основе моделей неизотермического токораспределения в приборных структурах. Дис. ... докт. техн. наук. Ульяновск: УлГТУ, 2005. 328 с.
15. *Сергеев В.А., Ходаков А.М.* Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов. Ульяновск: УлГТУ, 2012.
16. *Бубенников А.Н.* Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. М.: Высш. школа, 1989.