

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.317

## Токораспределение в гребенчатых структурах биполярных и гетеробиполярных СВЧ транзисторов с учетом сопротивления дорожек металлизации

<sup>1</sup>Сергеев В.А., <sup>1</sup>Ходаков А.М., <sup>1</sup>Фролов И.В., <sup>1,2</sup>Казанков А.А.

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновский филиал, <http://www.ulireran.ru/>

Ульяновск 432071, Российская Федерация

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, <https://www.ulstu.ru/>  
Ульяновск 432027, Российская Федерация

E-mail: [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru), [ln23al@yandex.ru](mailto:ln23al@yandex.ru), [ilya-frolov88@mail.ru](mailto:ilya-frolov88@mail.ru), [kazankov1992@gmail.com](mailto:kazankov1992@gmail.com)

Поступила 05.05.2024, рецензирована 07.05.2024, принята 10.05.2024

**Аннотация:** Представлен краткий анализ причин неоднородного и неустойчивого распределения тока между элементарными транзисторами в гребенчатых структурах (ГС) биполярных (БТ) и гетеробиполярных (ГБТ) СВЧ транзисторов. Получено выражение для тока, втекающего в элементарный транзистор ГС, с учетом сопротивления эмиттерной дорожки металлизации. Приведена оценка влияния технологического разброса сопротивлений эмиттерных дорожек металлизации на неравномерность распределения полного тока транзистора между элементарными транзисторами. Показано, что сопротивление эмиттерных дорожек металлизации играет стабилизирующую роль и приводит к повышению тепловой устойчивости токораспределения в ГС, при этом наименее устойчивым к тепловому пробую будет элементарный транзистор ГС с наименьшим сопротивлением эмиттерной дорожки и наибольшим тепловым сопротивлением. Предложены рекомендации по выравниванию и повышению устойчивости токораспределения в ГС БТ и ГБТ.

**Ключевые слова:** биполярный и гетеробиполярный СВЧ транзистор, гребенчатая структура, сопротивление дорожек металлизации, неоднородность распределения тока, тепловая неустойчивость токораспределения

УДК 621.382.029

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

**Для цитирования:** Сергеев В.А., Ходаков А.М., Фролов И.В., Казанков А.А. Токораспределение в гребенчатых структурах биполярных и гетеробиполярных СВЧ транзисторов с учетом сопротивления дорожек металлизации. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3):317-324. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.317.

## Current distribution in comb structures of bipolar and heterobipolar microwave transistors taking into account the metallization tracks resistance

Vyacheslav A. Sergeev, Alexander M. Hodakov, Ilya V. Frolov

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Ulyanovsk Branch, <http://www.ulireran.ru/>

Ulyanovsk 432071, Russian Federation

*E-mail: sva@ulstu.ru, ln23al@yandex.ru, ilya-frolov88@mail.ru*

**Alexander A. Kazankov**

Ulyanovsk State Technical University, <https://www.ulstu.ru/>

Ulyanovsk 432027, Russian Federation

*E-mail: kazankov1992@gmail.com*

*Received May 05, 2024, peer-reviewed May 07, 2024, accepted May 10, 2024*

**Abstract:** A brief analysis of the causes of inhomogeneous and unstable current distribution between elementary transistors in comb structures (CS) of bipolar (BT) and heterobipolar (HBT) microwave transistors is presented. An expression for the current flowing into a CS elementary transistor, taking into account the emitter track metallization resistance, is derived. An estimation of the influence of technological variation of emitter metallization track resistances on the non-uniformity of the transistor total current distribution between elementary transistors is given. It is shown that resistance of emitter tracks of metallization plays a stabilizing role and leads to increase of thermal stability of current distribution in CS, thus the least stable to thermal breakdown will be elementary transistor of CS with the least resistance of emitter track and the greatest thermal resistance. Recommendations on equalization and increase of stability of current distribution in CS of BT and HBT are offered.

**Keywords:** bipolar and heterobipolar microwave transistors, comb structure, metallization track resistance, current distribution inhomogeneity, current distribution thermal instability

**UDC 621.382.029**

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the state assignment Kotelnikov IRE RAS.

**For citation:** Vyacheslav A. Sergeev, Alexander M. Hodakov, Ilya V. Frolov, Alexander A. Kazankov. Current distribution in comb structures of bipolar and heterobipolar microwave transistors taking into account the metallization tracks resistance. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(3):317-324e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.317.

## СОДЕРЖАНИЕ

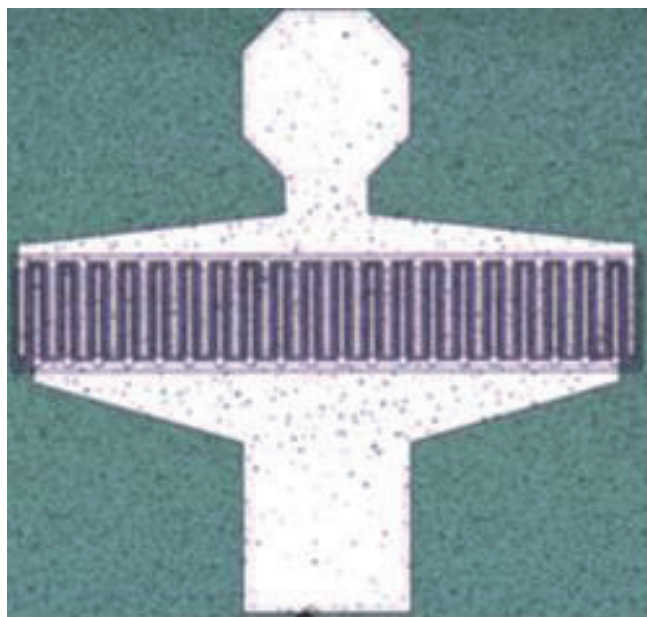
1. ВВЕДЕНИЕ (318)
  2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА В ГРЕБЕНЧАТОЙ СТРУКТУРЕ (320)
  3. ТЕПЛОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТОКА В ГРЕБЕНЧАТОЙ СТРУКТУРЕ (322)
  4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (323)
- ЛИТЕРАТУРА (323)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В современной аппаратуре радиосвязи и телекоммуникаций наряду с МДП и НЕМТ СВЧ транзисторами широко применяются мощные биполярные (БТ) и гетеробиполярные (ГБТ) СВЧ транзисторы [1-3], которые обеспечивают высокую выходную мощность на СВЧ при большой

плотности тока и высоком напряжении. При этом значительные усилия исследователей направлены на повышение надежности этого класса приборов, поскольку для БТ и ГБТ характерно наличие сильной положительной тепловой обратной связи (ПТОС), приводящей к неоднородному и неустойчивому распределению плотности тока, локальным перегревам и термомеханическим напряжениям в приборных структурах [4-6], и, как следствие, к ускорению механизмов деградации и отказам приборов.

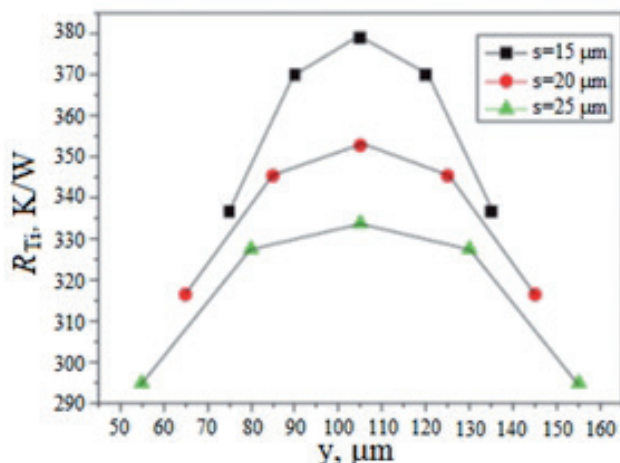
Наиболее распространенной геометрией структур современных мощных БТ и ГБТ является полосковая или гребенчатая геометрия с параллельным расположением



**Рис. 1.** Гребенчатая структура ГБТ с 20 элементарными транзисторами [5].

элементарных транзисторов (ячеек) (см. **Рис. 1** [5]). При большой площади эмиттера или при наличии большого числа отдельных эмиттеров (элементарных транзисторов) в одном кристалле практически невозможно обеспечить однородность (идентичность) их электрических характеристик. Распределение плотности тока в транзисторной структуре даже в изотермическом приближении будет неоднородным (неравномерным), например, из-за неравномерного распределения легирующих примесей по площади кристалла; при этом ПТОС увеличивает эту неоднородность.

Даже в идеальном случае однородного изотермического распределения полного тока эмиттера между элементарными транзисторами, распределение температуры по площади кристалла существенно неоднородно в результате действия краевых эффектов. Это, в свою очередь, приведет к перераспределению тока в результате саморазогрева гребенчатой структуры (ГС) в активном режиме работы транзистора. Так в работе [4] на примере SiGe ГБТ с пятью эмиттерными дорожками размером  $60 \times 3 \mu\text{m}$  на кристалле размером  $210 \times 153 \mu\text{m}$  и толщиной  $100 \mu\text{m}$  методами компьютерного моделирования и экспериментально показано,



**Рис. 2.** Тепловое сопротивление элементарных транзисторов в ГС ГБТ с пятью дорожками при различном расстоянии  $s$  между ними [4].

что тепловое сопротивление  $R_T$  центрального элементарного транзистора на 12-15% больше теплового сопротивления краевых элементарных транзисторов, при этом тепловые сопротивления всех элементарных транзисторов увеличиваются при уменьшении расстояния между дорожками (**Рис. 2**). Аналогичные результаты были получены нами ранее для ГС БТ [6]. В результате действия ПТОС через центральные дорожки ГБТ будут протекать токи большей плотности, что приводит к увеличению выделения тепла, что в конечном итоге может привести к тепловому пробоему или деградации прибора, что особенно сильно проявляется при высоких уровнях инжекции [7].

Чтобы снизить неравномерное распределение температуры и решить эти проблемы, используют различные варианты проектирования геометрии ГС, включая изменение длины дорожек [8] и изменение геометрии и расстояния между эмиттерами ГБТ [9,10], что позволяет уменьшить разницу температур вдоль направления ширины эмиттера.

Токораспределение и теплоэлектрические процессы в ГС БТ и ГБТ в известных работах рассматриваются без учета падения напряжения на дорожках металлизации, которое приводит к существенно неоднородному распределению плотности эмиттерного тока вдоль

эмиттерных дорожек [11-13]. Как показывает анализ отказавших в результате теплового пробоя мощных БТ с ГС, проплавление базы практически всегда наблюдается под началом эмиттерной дорожки, полное сопротивление которой меньше сопротивлений других дорожек. Для объяснения этого явления в данной статье рассмотрено токораспределение и его устойчивость в ГС БТ и ГБТ с учетом влияния сопротивления эмиттерных дорожек металлизации.

## 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА В ГРЕБЕНЧАТОЙ СТРУКТУРЕ

В работах [11-13] рассмотрено распределение плотности эмиттерного тока под эмиттерной дорожкой в ГС БТ и ГБТ СВЧ транзисторов (Рис. 3) в различных режимах работы транзисторов. В данной статье мы ограничимся одномерным приближением распределения плотности эмиттерного тока  $J_{em}(x)$  под дорожкой вдоль оси  $x$  (Рис. 3б) при относительно небольших эмиттерных токах  $I_{em}$ , при которых падением напряжения на сопротивлении  $r_n$  пассивных областей ГС можно пренебречь.

В работе [11] для ГС с длиной дорожек, не превышающих толщину кристалла, в изотермическом приближении, то есть в предположении, что температура эмиттерного

перехода  $T_n$  не сильно меняется вдоль эмиттерных дорожек металлизации:  $T_n(x) \approx \text{const}$ , получено общее выражение для плотности эмиттерного тока  $J_{em}(x)$  под дорожкой с учетом влияния сопротивлений как эмиттерной так и базовой дорожек металлизации:

$$J_{em}(x) = \frac{2\varphi_T}{[R_{BM}(1-\alpha) + R_{EM}]S_{EM}} \times \times B_1^2 \cos^{-2}[B_1(B_2 - \bar{x})], \quad (1)$$

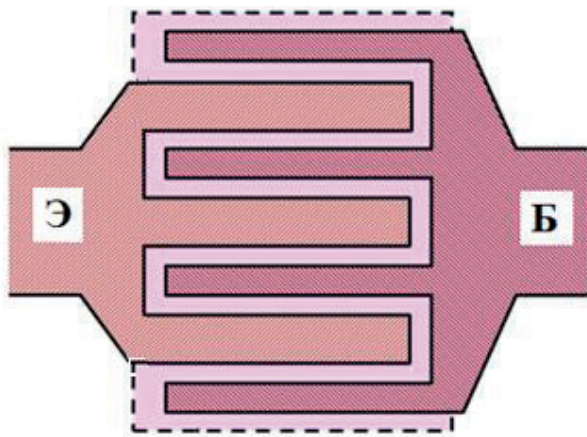
где  $\bar{x} = x/L_{EM}$ ,  $L_{EM}$  – длина эмиттерной дорожки металлизации,  $\alpha$  – коэффициент передачи тока в схеме с общей базой, а постоянные интегрирования  $B_1$  и  $B_2$  находятся из решения системы уравнений, полученных из граничных условий:

$$B_1 \operatorname{tg} B_1 B_2 = \frac{R_{EM} I_{em}}{2\varphi_T}, \quad (2a)$$

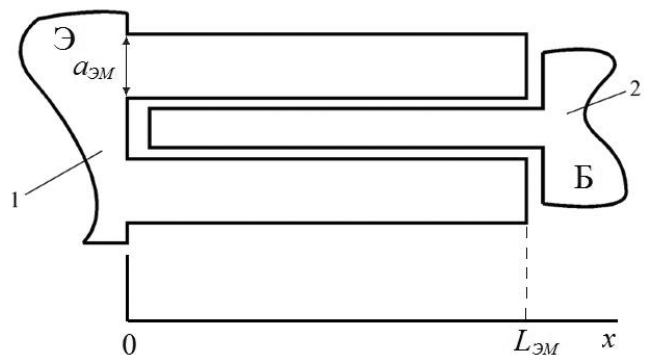
$$B_1 \operatorname{tg}[B_1(1 - B_2)] = \frac{R_{BM}(1 - \alpha) I_{em}}{2\varphi_T}, \quad (2b)$$

а  $R_{EM}$  и  $R_{BM}$  – полные сопротивления дорожек металлизации,  $\varphi_T = kT_n/e$  – тепловой потенциал,  $k$  – постоянная Больцмана,  $e$  – элементарный заряд.

В активном режиме работы транзистора при  $\alpha \approx 1$  влиянием сопротивления базовой металлизации можно пренебречь и при условии  $R_{EM} I_{em} \ll 2\varphi_T$ , ограничиваясь



а



б

Рис. 3. Геометрия (а) и элемент (б) гребенчатой структуры БТ и ГБТ: 1 - эмиттерная металлизация; 2 - базовая металлизация.

линейным членом в разложении  $\text{tg}\beta$  по степеням  $\beta$ , из решения (2) нетрудно получить

$$B_1^2 \approx \frac{R_{EM} I_{em}}{2\varphi_T}, \quad B_2 = 1. \quad (3)$$

Подставляя полученные выражения для  $B_1$  и  $B_2$  в (1) для плотности эмиттерного тока у основания дорожки, получим:

$$J_{em}(0) = \frac{I_{em}}{S_{em}} \cos^{-2} B_1. \quad (4)$$

Ограничиваясь двумя членами в разложении  $\cos B_1$  по степеням  $B_1$ , из (4) можно получить приближенное выражение для полного тока, втекающего в  $i$ -ю дорожку (элементарный транзистор) ГС, в виде:

$$I_{emi} \approx I_{em0} \left( 1 - \frac{R_{EMi} I_{em0}}{2\varphi_{Ti}} \right), \quad (5)$$

где  $I_{em0} = S_{cm} J_{cm}(0)$ ,  $S_{cm} = L_{EM} a_{EM}$  – площадь эмиттерной дорожки,  $a_{EM}$  – ширина эмиттерной дорожки,  $J_{cm}(0)$  – плотность эмиттерного тока у основания дорожек, одинаковая для всех элементарных транзисторов,  $\varphi_{Ti} = kT_{ni}/e$ ,  $T_{ni}$  – температура эмиттерного перехода  $i$ -го элементарного транзистора.

Для полного эмиттерного тока, втекающего в ГС, содержащую  $N$  элементарных транзисторов, можно записать следующее приближенное выражение:

$$\begin{aligned} I_{em\Sigma} &= \sum_{i=1}^N I_{emi} \approx \sum_{i=1}^N I_{em0} \left( 1 - \frac{R_{EMi} I_{em0}}{2\varphi_{Ti}} \right) \approx \\ &\approx N I_{em0} \left( 1 - \frac{\bar{R}_{EM} I_{em0}}{2\varphi_T} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

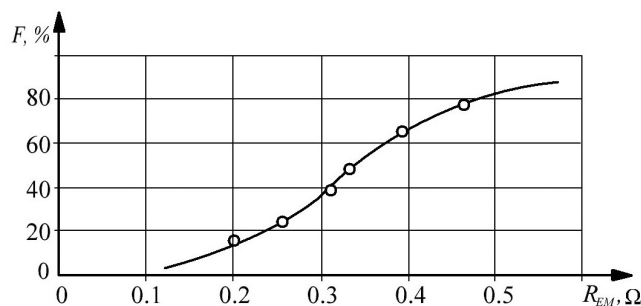
где  $\bar{R}_{EM}$  – среднее значение сопротивления эмиттерных дорожек в ГС,  $\varphi_T = k\bar{T}_n/e$ ,  $\bar{T}_n$  – средняя температура эмиттерного перехода транзистора.

Согласно модели Эберса-Молла плотность эмиттерного тока у основания дорожек определяется напряжением на эмиттерном переходе:

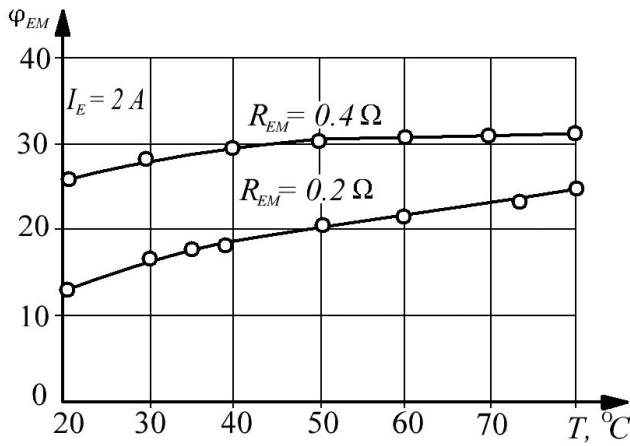
$$\begin{aligned} J_{em}(0) &= \\ &= J_{em0} T^3 \exp \left\{ \frac{-E_g + e(U_{EB} - r_n S_{em} J_{em}(0))}{kT_n} \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $J_{em0}$  – слабо зависящий от температуры параметр,  $E_g$  – ширина запрещенной зоны полупроводника, и дополнительное падение напряжения на сопротивлении эмиттерных дорожек металлизации приводит к увеличению падения напряжения на эмиттерном переходе для поддержания заданного значения полного тока  $\Delta U_{EB} \approx \bar{R}_{EM} I_{em\Sigma} / N$ .

Более важным следствием (5) является неравномерное распределение токов элементарных транзисторов, обусловленное технологическим разбросом сопротивлений дорожек эмиттерной металлизации. Экспериментально неравномерность распределения токов в ГС можно наблюдать и оценить по интенсивности рекомбинационного излучения [14], либо по измерению падения напряжения на дорожках. На **Рис. 4** показано распределение эмиттерных дорожек металлизации по величине сопротивления  $R_{EM}$ , измеренного зондовым методом на 10 структурах транзисторов КТ803А измерительным мостом Е12-2 с погрешностью не хуже 20%. Это распределение близко к нормальному со средним значением  $0.32\Omega$  (расчетное значение  $R_{EM} = 0.16 \pm 0.04 \Omega$ ) и среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{\bar{R}_{EM}} \approx 0.14\Omega$ . Причиной такого разброса является, вероятно, неоднородность толщины слоев металлизации и ее структурные несовершенства. Неравномерное распределение тока между элементарными транзисторами с различными сопротивлениями эмиттерных дорожек подтверждается



**Рис. 4.** Распределение эмиттерных дорожек транзисторов КТ803А по величине сопротивления.



**Рис. 5.** Зависимость падения напряжения на эмиттерных дорожках металлизации транзистора КТ803А от температуры.

измерением потенциала  $\varphi_{EM}(L_{EM})$  на концах различных дорожек (Рис 5).

С увеличением температуры распределение тока между дорожками становится более равномерным, о чем свидетельствует возрастание потенциалов  $\varphi_{EM}(L_{EM})$  и уменьшение разности потенциалов между концами дорожек. Аналогичный характер распределений дорожек по величине сопротивления наблюдался и у транзисторов других типов.

### 3. ТЕПЛОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТОКА В ГРЕБЕНЧАТОЙ СТРУКТУРЕ

Рассмотрим условие тепловой неустойчивости в отдельном элементарном транзисторе ГС БТ или ГБТ с учетом влияния сопротивления эмиттерной металлизации. Мощность, выделяющаяся в элементарном транзисторе, будет приводить к повышению температуры эмиттерного перехода, что в свою очередь в результате действия ПТОС приведет к увеличению тока. Согласно одномерной модели [15] поперечная тепловая неустойчивость токораспределения и образование шнура тока в БТ и ГБТ наступает тогда, когда случайное приращение (флуктуация) тока приводит к такому приращению температуры, которое в результате действия ПТОС вызывает еще большее приращение тока, и условие неустойчивости записывается в виде:

$$\xi_{Ti} I_{emi} U_{CV} R_{Ti} \geq 1, \quad (8)$$

где  $\xi_{Ti} = \frac{1}{I_{emi}} \frac{\partial I_{emi}}{\partial T_{ni}}$  — относительный температурный коэффициент эмиттерного тока  $i$ -го элементарного транзистора,  $U_{CV}$  — коллекторное напряжение, одинаковое для всех элементарных транзисторов.

Дифференцирование (5) с учетом (7) дает следующее выражение для  $\xi_{Ti}$ :

$$\xi_{Ti} = \frac{3kT_{ni} + E_g - eU_{EB}}{T_{ni}(kT_{ni} + eI_{emi}r_n)} \left( 1 - \frac{eR_{EMi}I_{em0}}{kT_{ni}} \right) + \frac{eR_{EMi}I_{em0}}{2kT_{ni}^2}. \quad (9)$$

Простые оценки показывают, что вторым слагаемым в правой части (9) можно пренебречь. Анализ условия (8) после подстановки выражений (5) и (9) показывает, что сопротивление эмиттерной металлизации в общем случае играет стабилизирующую роль. При заданном полном эмиттерном токе транзистора зависимость коллекторного напряжения  $U_{CV}$ , при котором будет наступать неустойчивость тока в  $i$ -ом элементарном транзисторе, от сопротивления эмиттерной дорожки будет иметь вид

$$U_{CVi} \sim \left[ \left( 1 - \frac{R_{EMi}I_{em0}}{2\varphi_{Ti}} \right) \left( 1 - \frac{R_{EMi}I_{em0}}{\varphi_{Ti}} \right) R_{Ti} \right]^{-1} \approx \left( 1 - \frac{3R_{EMi}I_{em0}}{2\varphi_{Ti}} \right)^{-1} R_{Ti}^{-1}. \quad (10)$$

Технологический разброс сопротивлений эмиттерной дорожки приводит к тому, что при одинаковых тепловых сопротивлениях элементарных транзисторов в ГС менее устойчивым будет элементарный транзистор с наименьшим сопротивлением эмиттерной дорожки. Как показано выше, тепловые сопротивления элементарных транзисторов на краях и в центре реальных ГС заметно различаются, и при одинаковых сопротивлениях эмиттерных дорожек менее устойчивым будет центральный элементарный транзистор с наибольшим тепловым сопротивлением.

В общем случае элементарный транзистор ГС с наименьшим сопротивлением эмиттерной дорожки и наибольшим

тепловым сопротивлением будет иметь наибольшую плотность тока и температуру, и, как следствие, будет менее устойчивым к тепловому пробую. Для выравнивания токораспределения и повышения тепловой устойчивости элементарных транзисторов ГС необходимо обеспечить постоянство выражения в правой части (10); для этого можно рекомендовать формировать сопротивления эмиттерных дорожек с учетом расчетных значений тепловых сопротивлений элементарных транзисторов, что технологически можно реализовать путем изменения толщины дорожек или подбора удельного сопротивления материала металлизации.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленный анализ показывает, что сопротивление эмиттерных дорожек металлизации в ГС БТ и ГБТ и приводит к неравномерному распределению тока между элементарными транзисторами в активном режиме работы транзисторов.

В результате ПТОС токораспределение в ГС БТ и ГБТ при определенных значениях эмиттерного тока и коллекторного напряжения может потерять устойчивость. При этом сопротивление эмиттерной металлизации в общем случае играет стабилизирующую роль. В общем случае элементарный транзистор ГС с наименьшим сопротивлением эмиттерной дорожки и наибольшим тепловым сопротивлением будет иметь наибольшую плотность эмиттерного тока и температуру, и как следствие будет менее устойчивым к тепловому пробую. Для выравнивания распределения тока тепловой устойчивости элементарных транзисторов в ГС БТ и ГБТ сопротивление дорожек металлизации формировать с учетом расчетных значений тепловых сопротивлений элементарных транзисторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Jianjun G. *Heterojunction Bipolar Transistors for Circuit Design: Microwave Modeling and Parameter Extraction*. United States, John Wiley & Sons Inc, 2015.
2. Xin W, Akshay A, Wei Q et al. Performance Prediction of InP/GaAsSb Double Heterojunction Bipolar Transistors for THz applications. *Journal of Applied Physics*, 2021, 130:034502.
3. Козловский ЭЮ, Захаров СИ, Семенова ЛМ, Тейдер АА. Разработка технологии изготовления гетеробиполярных транзисторов на основе структур InGaP/GaAs. *Труды 31-ой Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии"*, 3:27-29, 2021.
4. C Liang. Thermal effect characterization of multiple finger power HBT: Thermal resistance matrix. *IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference*, Chongqing, China, 2016, pp. 182-185, doi: 10.1109/ITNEC.2016.7560345.
5. Chen L, Zhang WR, Jin DY, Shen P, Xie HY, Ding CB, Xiao Y, Sun BT, Wang RQ. Thermal stability improvement of a multiple finger power SiGe heterojunction bipolar transistor under different power dissipations using non-uniform finger spacing. *Chinese Physics B*, 2011, 20:018501.
6. Сергеев ВА, Ходаков АМ. *Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов*. Ульяновск, УЛГТУ, 2012, 159 с.
7. Lu Z, Zhou L, Hu X. Electro-Thermal analysis of SiGe HBT under HPM Injection. *IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)*, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/NEMO49486.2020.9343573.
8. Dongyue Jin et al. Thermal stability of the power SiGe HBT with non-uniform finger length. *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, 2008, pp. 166-169, doi: 10.1109/ICMMT.2008.4540331.
9. Rui Chen, Dong-Yue Jin, Wan-Rong Zhang, Li-Fan Wang, Bin Guo, Hu Chen, Ling-Han

- Yin, Xiao-Xue Jia. Thermal resistance matrix representation of thermal effects and thermal design in microwave power HBTs with two-dimensional array layout. *Chinese Physics B*, 2019, 28(9); doi: 10.1088/1674-1056/ab3436.
10. Dongyue J, Wanrong Z, Hongyun X, Liang C, Pei S, Ning H. Structure optimization of multi-finger power SiGe HBTs for thermal stability improvement. *Microelectronics Reliability*, 2009, 49(4):382-386; doi: 10.1016/j.microrel.2009.01.008.
11. Сергеев В.А. Изотермическое токораспределение в гребенчатых структурах мощных ВЧ и СВЧ биполярных транзисторов. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2005, 2:344-351.
12. Sergeev VA, Khodakov AM. Two-Section Model of the Current Distribution in Strip Layouts of Bipolar and Hetero-Bipolar Microwave Transistors. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2022, 67(11):1400-1405.
13. Sergeev VA, Hodakov AM. Thermoelectric model of a heterojunction bipolar transistor taking into account the voltage drop on the current-carrying metallization. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2022, 14(2):103-110. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.103.
14. Sergeev VA, Frolov IV, Kazankov AA. Estimation of the Inhomogeneity of the Current Density and Temperature Distribution in the Structures of Bipolar and Heterobipolar High-Frequency and Ultrahigh-Frequency Transistors by Recombination Emission. *Optics and Spectroscopy*, 2023, 131(11):1387-1389. DOI: 10.61011/OS.2023.11.57001.5050-23.
15. Федотов ЯА (ред.). *Кремниевые планарные транзисторы*. М., "Сов. радио", 1973, 336 с.
- Сергеев Вячеслав Андреевич**  
д.т.н., профессор, член-корр. РАЕН  
УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия  
E-mail: sva@ulstu.ru
- Ходаков Александр Михайлович**  
к.ф.-м.н., с.н.с.  
УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия  
E-mail: ln23al@yandex.ru
- Фролов Илья Владимирович**  
к.т.н., доцент  
УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия  
E-mail: ilya-frolov88@mail.ru
- Казанков Александр Александрович**  
аспирант  
Ульяновский гос. техн. университет  
32, ул. Северный венец, Ульяновск 432027, Россия  
E-mail: kazankov1992@gmail.com.