

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.109

Динамическая теплоэлектрическая модель гетеропереходного биполярного транзистора с учетом падения напряжения на эмиттерных дорожках металлизации

^{1,2}Сергеев В.А., ¹Ходаков А.М.

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

Ульяновск 432071, Российская Федерация

²Ульяновский государственный технический университет, <https://www.ulstu.ru/>

Ульяновск 432027, Российская Федерация

E-mail: sva@ulstu.ru, hod22am@mail.ru

Поступила 20.03.2023, рецензирована 27.03.2023, принята 06.04.2023

Аннотация: Разработана динамическая 3D теплоэлектрическая модель для расчета температурного поля и плотности эмиттерного тока в гребенчатой структуре гетеропереходного биполярного транзистора (ГБТ) с учетом неоднородного распределения плотности тока под эмиттерными дорожками, обусловленного падением напряжения на сопротивлении токоведущей металлизации и действия положительной тепловой обратной связи в структуре. В основе модели лежит итерационное решение в программной среде COMSOL Multiphysics нестационарного уравнения теплопроводности совместно с системой уравнений для распределения электрического потенциала вдоль эмиттерной дорожки и плотности тока под дорожкой. Показано, что в процессе действия импульса греющей мощности в ГБТ распределение температуры и плотности тока вдоль эмиттерных дорожек меняют характер, соответственно, от однородного и монотонно спадающего до немонотонно изменяющегося. При этом максимальные температура и плотность тока достигают стационарных значений с темпом, существенно превышающим темп нарастания перегрева при однородном нагреве структуры, а максимумы температуры и плотности тока в процессе саморазогрева смещаются от начала к центру дорожек. Предложенная модель может быть использована для оценки неоднородности распределения температуры и плотности тока в структуре ГБТ и его предельных электрических параметров в импульсных режимах работы.

Ключевые слова: гетеропереходный биполярный транзистор, динамическая теплоэлектрическая модель, плотность тока, температура, неоднородность

УДК 621.382.029

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

Для цитирования: Сергеев В.А., Ходаков А.М. Динамическая теплоэлектрическая модель гетеропереходного биполярного транзистора с учетом падения напряжения на эмиттерных дорожках металлизации. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(2):109-116. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.109.

Dynamic thermoelectric model of a heterojunction bipolar transistor taking into account the voltage drop on the emitter metallization tracks

^{1,2}Vyacheslav A. Sergeev, ¹Alexander M. Hodakov

¹Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Ulyanovsk Branch, <http://www.ulireran.ru/>
Ulyanovsk 432071, Russian Federation

²Ulyanovsk State Technical University, <https://www.ulstu.ru/>

Ulyanovsk 432027, Russian Federation

E-mail: sva@ulstu.ru, hod22am@mail.ru

Received March 20, 2023, peer-reviewed March 27, 2023, accepted April 6, 2023

Abstract: A dynamic 3D thermoelectric model has been developed to calculate the temperature field and emitter current density in the comb structure of a heterojunction bipolar transistor (HBT) with the length of the emitter metallization paths comparable to the size of the crystal, taking into account the inhomogeneous distribution of current density under the emitter paths caused by a voltage drop on the resistance of the current-carrying metallization. The model is based on an iterative solution in the COMSOL Multiphysics software environment of a non-stationary heat equation together with a system of equations for the distribution of electric potential along the emitter path and the current density under the path. It is shown that during the action of the heating power pulse in the HBT, the distribution of temperature and current density along the emitter tracks change character, respectively, from homogeneous and monotonically decreasing to non-monotonically changing. At the same time, the maximum temperature and current density reach stationary values with a rate significantly exceeding the rate of overheating increase with homogeneous heating of the structure, and the maxima of temperature and current density in the process of self-heating shift from the beginning to the center of the tracks. The proposed model can be used to evaluate the thermomechanical stresses in the structure of the HBT and the limiting electrical parameters in the pulsed modes of operation of the HBT.

Keywords: heterojunction bipolar transistor, dynamic thermoelectric model, current density, temperature, inhomogeneity

UDC 621.382.029

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-29-01134).

For citation: Vyacheslav A. Sergeev, Alexander M. Khodakov. Dynamic thermoelectric model of a heterojunction bipolar transistor taking into account the voltage drop on the emitter metallization tracks. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(2):109-116e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.109.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (110)
 2. ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ (112)
 3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ
ВЫЧИСЛЕНИЙ (113)
 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (115)
- ЛИТЕРАТУРА (115)

1. ВВЕДЕНИЕ

Наряду с активной разработкой МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) и НЕМТ (High Electron Mobility Transistor) СВЧ транзисторов в современной аппаратуре радиосвязи и телекоммуникаций широко используются мощные биполярные (БТ), в том числе гетеропереходные (ГБТ), СВЧ транзисторы [1-4]. 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 наличие сильной положительной тепловой обратной связи (ПТОС) и проявление эффектов неоднородного и неустойчивого распределения плотности тока, мощности и температуры в транзисторных структурах [5-7], которые приводят к локальным перегревам и термомеханическим напряжениям структуры и, как следствие, к ускорению механизмов деградации и отказам приборов.

Одной из наиболее распространенных геометрий структур современных мощных БТ и ГБТ является полосковая или гребенчатая геометрия с параллельным расположением элементарных транзисторов (ячеек) ГБТ (см.

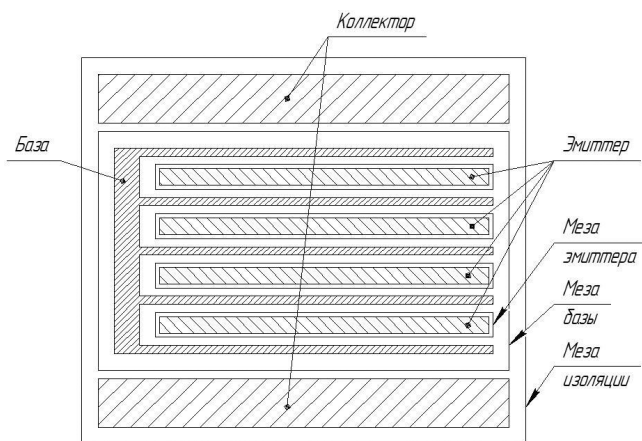


Рис. 1. Топология активной области транзисторов ГБТ [4].

Рис. 1 [4] и Рис. 2 [7]). Саморазогрев каждой ячейки ГБТ рассеиваемой мощностью и тепловая связь между соседними ячейками приводят к неравномерному температурному профилю матрицы элементарных транзисторов ГБТ. Из-за положительного температурного коэффициента эмиттерного тока через центральные ячейки ГБТ с более высокой температурой будут протекать токи большей плотности, что приводит к увеличению выделения тепла, что в конечном итоге может привести к тепловому пробую или деградации прибора [8,9], что особенно сильно проявляется при высоких уровнях инжекции [10].

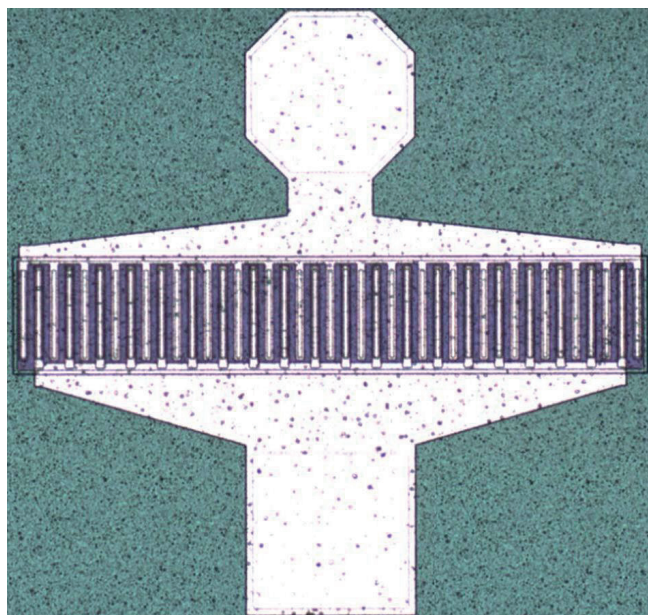


Рис. 2. Гребенчатая структура ГБТ с 20 элементарными транзисторами [7].

Чтобы снизить неравномерное распределение температуры и решить эти тепловые проблемы, используют различные варианты одномерного проектирования геометрии, включая изменение длины излучателя в ячейках ГБТ [7] и изменение расстояния между эмиттерами между ячейками ГБТ [8], что позволяет уменьшить разницу температур между отдельными ячейками.

В известных работах теплоэлектрические процессы в гребенчатых структурах ГБТ рассматривались без учета падения напряжения на токоведущих дорожках эмиттерной металлизации, которое приводит к существенного неоднородному распределению плотности эмиттерного тока, а значит и плотности рассеиваемой мощности вдоль эмиттерных дорожек [11-13].

В работе [14] нами рассмотрена стационарная теплоэлектрическая модель структуры ГБТ СВЧ транзистора с учетом падения напряжения на токоведущих дорожках эмиттерной металлизации. Показано, что распределения температуры и плотности тока вдоль эмиттерных дорожек структуры меняют свой характер: из монотонно и слабо спадающих от начала дорожки к концу в изотермическом приближении эти распределения становятся немонотонными и существенно неоднородными. Кроме того, максимум плотности тока и температуры с увеличением рабочего тока смещается от начала к центру дорожки. Заметим, что критически важным для полупроводниковых структур является не абсолютное отклонение локальной температуры структуры от среднего значения, а градиент изменения температуры, который определяет уровень термомеханических напряжений и динамику процессов электромиграции в элементах структуры [15].

В радиоэлектронных системах ГBT СВЧ транзисторы работают, как правило, не в стационарных, а импульсных режимах с длительностью и скважностью импульсов, изменяющихся в широких пределах. При этом очевидно, что в процессе действия импульса рассеиваемой мощности, распределение плотности тока и температуры в структуре будет трансформироваться. В данной статье представлена 3D теплоэлектрическая модель для расчета температурного поля и распределения плотности эмиттерного тока в гребенчатой структуре ГBT с учетом совместного влияния всех перечисленных выше факторов неоднородного распределения тока и температуры в приборной структуре, включая неоднородное распределение плотности тока под эмиттерными дорожками в результате падения напряжения на сопротивлении токоведущей металлизации.

2. ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

На Рис. 3 изображена применяемая при расчете температурных полей геометрия модели полупроводниковой структуры ГBT, которая представляет собой прямоугольный полупроводниковый кристалл размерами $l_x \times l_y \times l_z$, с расположенными на его верхней поверхности эмиттерными дорожками металлизации размерами $a_e \times L_e \times b_e$. Кристалл размещен на идеальном теплоотводе с

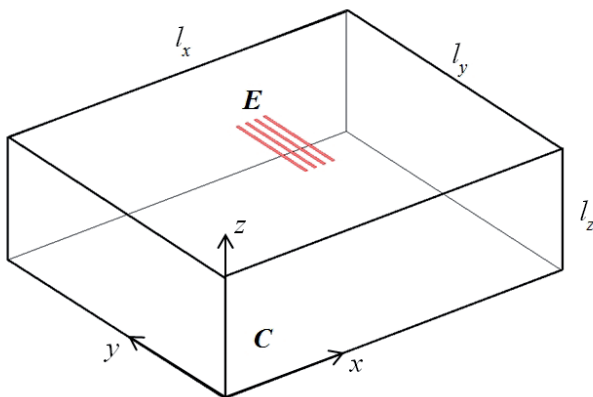


Рис. 3. Геометрия модели структуры ГBT: E – эмиттер, C – полупроводниковый кристалл.

температурой T_0 . Как и в [14], полагая дорожки эмиттера узкими, пренебрежем эффектом оттеснения эмиттерного тока к боковым краям дорожек по координате x.

Температурное поле в структуре ГBT $T(x, y, z, t)$ в произвольный момент времени t в процессе саморазогрева структуры импульсом греющей мощности находится из решения нестационарного уравнения теплопроводности

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla_{x,y,z}(\lambda(T)\nabla_{x,y,z}T) = 0, \quad (1)$$

где c, ρ, λ – коэффициенты теплоемкости, плотности и теплопроводности материала кристалла, со следующими граничными условиями:

- боковые поверхности и верхняя поверхность кристалла теплоизолированы;
- температура нижней поверхности кристалла равна температуре теплоотвода T_0 ;
- на верхней поверхности в области эмиттера структуры задана плотность греющей мощности, определяемая по формуле:

$$q_e(T) = -\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=l_z} = \begin{cases} J_e(T)U_c, & (x, y) \in S_e \\ 0, & (x, y) \in S - S_e \end{cases}, \quad (2)$$

где $S, S_e = na_eL_e$ – площади верхней поверхности кристалла и его активной области, n – число дорожек эмиттера, J_e, U_c – плотность тока эмиттера и напряжение на коллекторе.

В качестве начального условия для температуры при решении уравнения (1) принималось однородное распределение температуры по структуре ГBT

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (3)$$

Распределение плотности эмиттерного тока J_e под дорожкой эмиттерной металлизации структуры находится из решения следующей системы уравнений:

$$J_e(T) = J_{e0}(T/T_0)^3 \exp\left\{\frac{-E_g + e(U_e - \varphi_e - rS_e n^{-1} J_e(T))}{kT}\right\}, \quad (4)$$

где J_{e0} – слабо зависящий от температуры параметр, U_c – прямое падение напряжения на эмиттерном p - n переходе, E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника, e – заряд электрона, φ_c – потенциал эмиттерной металлизации, r – входное омическое сопротивление транзистора, k – постоянная Больцмана;

$$\frac{dJ_{em}(y)}{dy} = -\frac{J_e(y)}{h_e}, \quad (5)$$

$$\frac{d\varphi_e(y)}{dy} = -\frac{J_{em}(y)}{\sigma_{em}}, \quad (6)$$

$$J_{em}(y_{eb}) = I_e/h_e a_e, \quad (7)$$

$$J_{em}(y_{ee}) = 0, \quad (8)$$

$$\left. \frac{d\varphi_e}{dy} \right|_{y=y_{eb}} = -\frac{I_e}{\sigma_{em} h_e a_e}, \quad (9)$$

$$\left. \frac{d\varphi_e}{dy} \right|_{y=y_{ee}} = 0, \quad (10)$$

где I_c – полный эмиттерный ток, J_{em} – плотность тока по металлизации эмиттерной дорожки, y_{eb} и y_{ee} – координаты начала и конца дорожки, σ_{em} – удельная проводимость металлизации эмиттерной дорожки.

Для обеспечения условия включения транзистора в электрическую цепь (постоянство полного эмиттерного тока I_c) необходимо чтобы выполнялось равенство:

$$\iint_{S_e} J_e(x, y, t) dx dy = I_c. \quad (11)$$

3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Модельная нестационарная задача (1)-(11) решалась методом последовательных временных интервалов [16], то есть все время процесса теплопереноса было разбито на ряд интервалов $\Delta t = t_j - t_{j-1}$, внутри которых решалось нестационарное уравнение теплопроводности с начальными распределениями плотности мощности $q_{cj}(x, y, z, t_{j-1})$ и температуры $T_j(x, y, z, t_{j-1})$, найденными в результате решения

на предыдущем интервале. Значения потенциалов U_c и φ_c находилось численным итерационным методом, подобный алгоритм которого представлен в работе [17]. В качестве начального приближения зависимости $J_e^0(y)$ в итерационном процессе были выбраны значения плотности тока, рассчитанные по формуле [18]:

$$J_e^0(y) = \frac{2\varphi_{T_0}}{L_e a_e R_e} \cdot \frac{C^2}{\cos^2[C(1-y/L_e)]}, \quad (12)$$

где $\varphi_{T_0} = \frac{kT_0}{e}$ – температурный потенциал при $T_0 = 300$ К, значение которого равно 26 мВ; R_e – сопротивление металлизации дорожки эмиттера, а постоянная C находится из решения уравнения $\text{Stg}C = R_e I_c / 2n\varphi_{T_0}$.

Оригинальная программа включала в себя обращение к интерактивной программной среде COMSOL Multiphysics. Как и в работе [14], в качестве расчетного базового объекта исследования был выбран InGaP/GaAs ГБТ с размерами кристалла $300 \times 250 \times 100$ мкм и активной структурой транзистора с четырьмя золотыми эмиттерными дорожками шириной $a_e = 2$ мкм и толщиной $h_e = 0.5$ мкм, при этом длина дорожек при расчетах изменялась и задавалась в пределах $L_c = (40 \div 80)$ мкм. Функциональные зависимости от температуры теплофизических характеристик ϵ , ρ , λ материала кристалла выбирались из базы данных материалов программы COMSOL. Температура идеального теплоотвода T_0 принималась равной 300 К.

С целью сопоставления результатов расчетов с результатами расчетов по стационарной модели, численные расчеты по предложенной динамической модели приведены для варианта режима работы транзистора при $I_c = 40$ мА, $U_c = 7$ В. Начальное значение напряжения смещения на эмиттерном переходе $U_c = 1.2$ В. Полный ток транзисторной структуры считался

равномерно распределенным между эмиттерными дорожками металлизации.

На **Рис. 4** и **Рис. 5** показана динамика изменения максимальной и средней температуры структуры, а также максимальной плотности эмиттерного тока структуры ГБТ в процессе действия импульса греющей мощности.

Аппроксимируя изменение максимального и среднего перегрева структуры функцией вида $\Delta T(1 - \exp(-t/\tau_T))$, где τ_T тепловая постоянная времени, определяющая темп нарастания перегрева, по полученным зависимостям можно оценить изменение темпа нарастания перегрева в результате неоднородного токораспределения и действия ПТОС в структуре по сравнению со случаем однородного нагрева структуры. При нагреве структуры однородно распределенной плотностью мощности $\tau_T^{\text{homogen}} = \tau_{Tcr}$, где τ_{Tcr} тепловая постоянная времени кристалла, определяемая температуропроводностью α материала кристалла и его толщиной d : $\tau_{Tcr} = d^2/\alpha$, и для GaAs кристалла толщиной 100

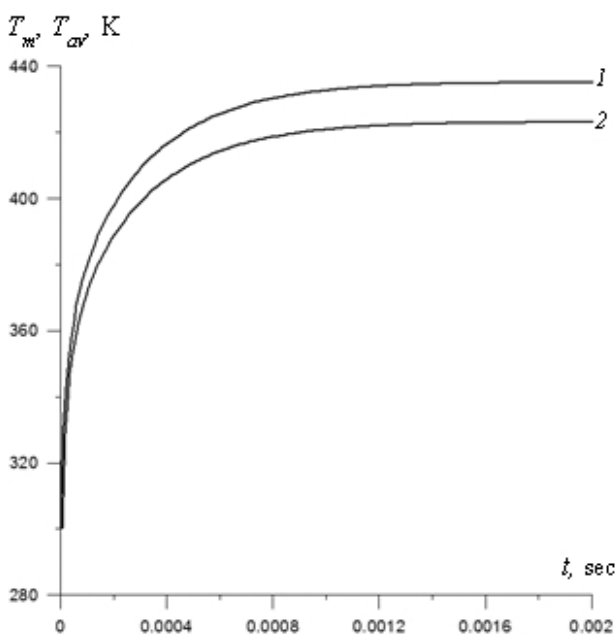


Рис. 4. Изменение максимальной (1) и средней (2) температуры активной области: $I_e = 40$ мА, $U_c = 7$ В; $a_e = 2$ мкм, $L_c = 60$ мкм, $h_c = 0.5$ мкм.

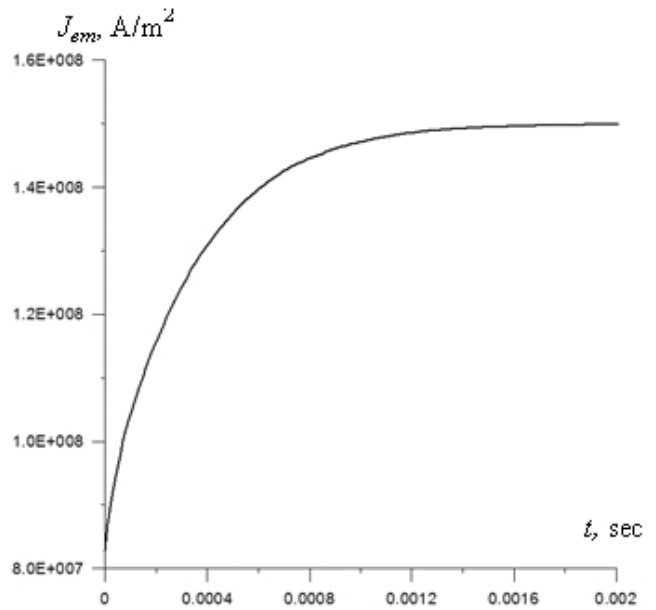


Рис. 5. Изменение максимальной плотности эмиттерного тока: $I_e = 40$ мА, $U_c = 7$ В; $a_e = 2$ мкм, $L_c = 60$ мкм, $h_c = 0.5$ мкм.

мкм составляющая около 300 мкс. Из зависимостей на Рис. 4 и Рис. 5 видно и численные расчеты показывают, что постоянная тепловая времени $\tau_T^{\text{heterogen}}$ при неоднородном нагреве и действии ПТОС составляет примерно 130 мкс, то есть в 2.3 раза меньше τ_T^{homogen} , то есть темп изменения максимального и среднего перегрева структуры существенно превышает темп нарастания перегрева при однородном нагреве структуры. Это, очевидно, обусловлено перераспределением плотности тока вдоль эмиттерных дорожек металлизации и, соответственно, плотности мощности, рассеиваемой в коллекторном переходе ГБТ под дорожкой.

Из представленных на **Рис. 6** распределений перегрева вдоль эмиттерной дорожки в разные моменты времени видно, что в процессе нагрева ГБТ максимальное значение температуры смещается от края дорожки к ее центру, то есть к центру кристалла.

Следует еще раз отметить также, что в предложенной модели не рассматривалось перераспределение полного тока структуры

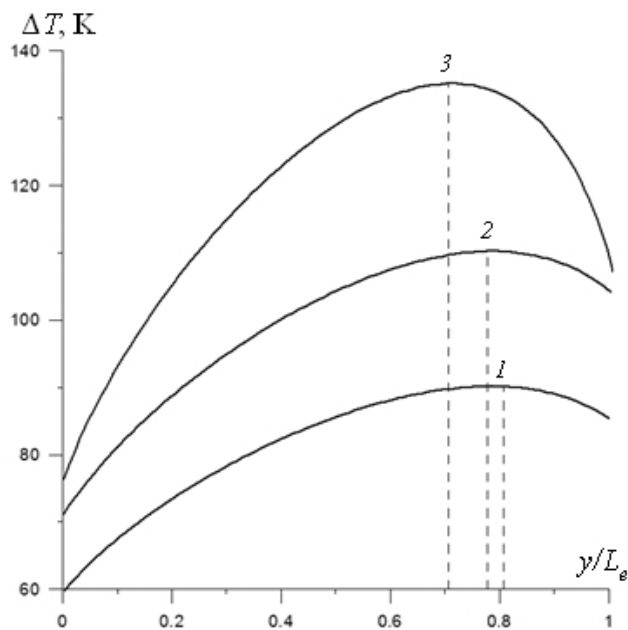


Рис. 6. Перегрев вдоль 3-й эмиттерной дорожки:
 $I_c = 40$ мА, $U_c = 7$ В; $a_c = 2$ мкм, $L_e = 60$ мкм,
 $b_c = 0.5$ мкм; t : 1 – 0.15, 2 – 0.3, 3 – 2 мс.

между ячейками в результате неравномерного разогрева ячеек структуры ГБТ из-за их различного расположения по отношению к краям кристалла. Этот эффект, вероятно, приведет к еще большей неоднородности распределения температуры и плотности тока в структуре и требует отдельного дополнительного анализа.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная динамическая теплоэлектрическая модель гребенчатой структуры ГБТ с учетом неоднородного распределения плотности эмиттерного тока в результате падения напряжения на эмиттерных дорожках металлизации и положительной теплоэлектрической обратной связи, действующей в структуре ГБТ, определяет темп и характер изменения распределения температуры и плотности тока вдоль эмиттерных дорожек структуры при действии импульса греющей мощности в ГБТ: из монотонно и слабо спадающих от начала дорожки к концу в изотермическом приближении эти распределения становятся немонотонными

и существенно неоднородными. При этом максимальные температура и плотность тока достигают стационарных значений с темпом, существенно превышающим темп нарастания перегрева при однородном нагреве структуры, а максимумы температуры и плотности тока в процессе саморазогрева структуры смещаются от начала к центру дорожек. Предложенная модель может найти применение при разработке структур ГБТ и оценке их предельных функциональных возможностей по току и температуре в импульсных режимах работы ГБТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jianjun Gao. *Heterojunction Bipolar Transistors for Circuit Design: Microwave Modeling and Parameter Extraction*. United States, John Wiley & Sons Inc, 2015, 280 p.
2. Xin Wen, Akshay Arabhavi, Wei Quan. Performance Prediction of InP/GaAsSb Double Heterojunction Bipolar Transistors for THz applications. *J. Appl. Phys.*, 2021, 130:034502.
3. Lachner R. Industrialization of mmWave SiGe technologies: Status, future requirements and challenges. *IEEE 13th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems*, 2013:105-107.
4. Козловский ЭЮ, Захаров СИ, Семенова ЛМ, Тейдер АА. Разработка технологии изготовления гетеробиполярных транзисторов на основе структур InGaP/GaAs. *Сб. трудов 31-ой Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии, КрыМиКо"*, Севастополь, Изд. СевГУ, 2021, 3:27-29.
5. Lee CP, Chau FHF, Ma W, Wang NL. The Safe Operating Area of GaAs-Based Heterojunction Bipolar Transistor. *IEEE Trans. Electron.*, 2006, 53(11):2681-2688.
6. Chen Liang. 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.
7. Jin Dongyue. Thermal stability of the power SiGe HBT with non-uniform finger length. *Proc. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, 2008:166-169; doi: 10.1109/ICMMT.2008.4540331.
 8. Dongyue Jin, Wanrong Zhang, Hongyun Xie, Liang Chen, Pei Shen, Ning Hu. Structure optimization of multi-finger power SiGe HBTs for thermal stability improvement. *Microelectronics Reliability*, 2009, 49(4):382-386.
 9. Rui Chen, Dong-Yue Jin, Wan-Rong Zhang, Li-Fan Wang, Bin Guo, Hu Chen, Ling-Han Yin and Xiao-Xue Jia. Thermal resistance matrix representation of thermal effects and thermal design in microwave power HBTs with two-dimensional array layout. *Chinese Phys. B*, 2019, 28(9):8502; doi: 10.1088/1674-1056/ab3436.
 10. Lu Z, Zhou L, X. 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)*, 2020:1-4.
 11. Caves KY, Barnes IA. Optimum length of emitter stripes in "comb" structure transistors. *IEEE Trans*, 1965, ED-12(2):84-85.
 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. Сергеев В.А. Аналитическая модель неизотермического распределения плотности мощности в структурах биполярных транзисторов. *Известия вузов. Электроника*, 2005, 3:22-28.
 14. 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.
 15. Hodakov AM, Tarasov RG, Sergeev VA, Kulikov AA. Thermal deformation model of the submodule of the X-band output power amplifier. *RENSIT: Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnye Tehnologii*, 2021, 13(1):13-18e. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.013.
 16. Коздоба ЛА. *Решение нелинейных задач теплопроводности*. Киев, Наукова думка, 1976, 136 с.
 17. Сергеев В.А., Ходаков А.М. *Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов*. Ульяновск, УЛГТУ, 2012, 159 с.
 18. Sergeev VA, Hodakov AM. Thermal model of a heterojunction bipolar transistor taking into account the voltage drop on the emitter fingers of metallization. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*, 2022. DOI: 10.1109/MWENT55238.2022.9802430.

Сергеев Вячеслав Андреевич

д.т.н., проф., 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: hod22am@mail.ru