

УДК 621.382.001.5

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА И ТЕМПЕРАТУРЫ В БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУРАХ С ДЕФЕКТАМИ В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ

© 2005 А. М. Ходаков

Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники РАН

Приведена теплоэлектрическая модель и получены аналитические выражения для неоднородных стационарных распределений плотности тока и температуры в биполярных транзисторных структурах с эмиттерами полосковой геометрии при рассеивании постоянной мощности и наличии неоднородности инжекционного типа в активной области структуры. Предложен алгоритм численного решения задачи, с учетом температурной зависимости плотности мощности в дефектной и бездефектной областях структуры. Представлены зависимости плотности тока и температуры от параметров и положения неоднородности. Произведена оценка термонапряжений, возникающих в подобных структурах.

Большинство полупроводниковых изделий характеризуется неоднородным распределением плотности тока и температуры в активной области полупроводниковой структуры. Дефекты различной природы в приборных структурах приводят, как правило, к возрастанию этих неоднородностей, ограничению функциональных возможностей полупроводниковых приборов, а в некоторых случаях их отказу в работе. Поэтому исходя из общей постановки задач диагностики, контроля качества и прогнозирования надёжности полупроводниковых изделий, необходима предварительная оценка распределений температуры и плотности тока в зависимости от геометрических и теплофизических параметров полупроводниковой структуры и дефекта. Наиболее характерно и опасно проявление эффектов неоднородного токораспределения для биполярных транзисторных структур, поскольку в этих структурах действует положительная тепловая обратная связь, обусловленная экспоненциальной зависимостью плотности эмиттерного тока от температуры. Исследованию распределений температуры и плотности тока в биполярных транзисторных структурах посвящён ряд работ [1-3]. В них подобные расчёты осуществлялись численными методами в одномерном приближении, или без учёта месторасположения дефекта в активной области структуры.

Целью настоящей работы являлось получение аналитических выражений для рас-

чёта температурных полей в биполярных транзисторных структурах с дефектами (неоднородностями) инжекционного типа в области эмиттерного перехода, определение степени зависимости максимальной температуры структуры от геометрических и теплофизических параметров структуры и дефекта, расчёт плотности эмиттерного тока в активной области с учётом тепловой обратной связи.

Рассмотрим плоскостную конструкцию (рис. 1), состоящую из полупроводни-

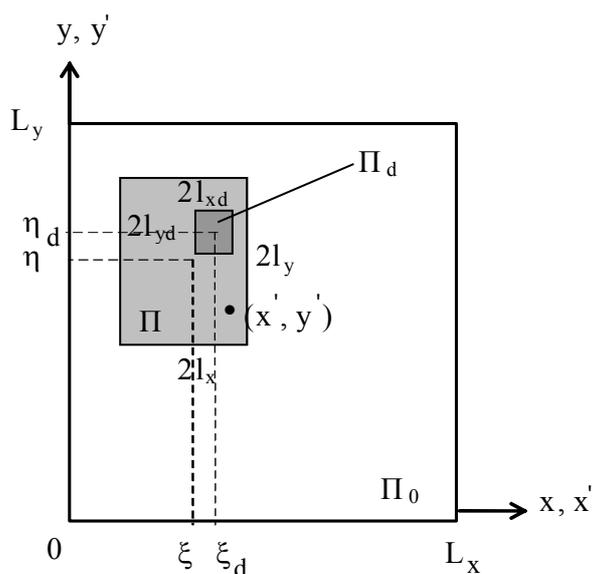


Рис. 1. Геометрия поверхности полупроводниковой структуры:

Π_0 – полупроводниковая пластина толщиной L_y ;
 Π – активная область; Π_d – дефект

ковой пластины прямоугольной геометрии толщиной L_z и идеального теплоотвода, толщина которого много больше толщины пластины и поэтому будем считать его полубесконечным. Источник тепла с плотностью теплового потока q , расположен на верхней поверхности Π_0 полупроводниковой пластины и занимает активную область Π прямоугольной формы. Часть этой области Π_d является дефектной и характеризуется плотностью теплового потока q_d . Отвод тепла через боковую поверхность полупроводниковой структуры и внешнюю поверхность с источником тепла отсутствует. Нижняя поверхность полупроводниковой пластины поддерживается при постоянной температуре T_T теплоотвода. Координаты геометрических центров областей Π и Π_d равны (ξ, η) и (ξ_d, η_d) соответственно. Краевая задача теплопроводности формулируется следующим образом:

- уравнение
$$\Delta T = 0, \quad (1)$$

где $T = T_{nn} - T_T$ – разность температур полупроводниковой пластины и теплоотвода; Δ – оператор Лапласа;

- граничные условия

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0, L_x} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0, L_y} = 0, \quad T|_{z=L_z} = 0, \quad (2)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = \begin{cases} q_d, (x, y) \in \Pi_d \\ q, (x, y) \in (\Pi - \Pi_d) \\ 0, (x, y) \in (\Pi_0 - \Pi) \end{cases}, \quad (3)$$

где L_x и L_y – характерные размеры области Π_0 , λ – коэффициент теплопроводности полупроводника.

Выполняется общий баланс мощности:

$$W_0 = \iint_{\Pi - \Pi_d} q(x, y) dx dy + \iint_{\Pi_d} q_d(x, y) dx dy, \quad (4)$$

где W_0 – полная мощность тепловыделения.

Рассмотрим решение задачи в предположении, что плотности тепловых потоков q и q_d постоянны. Введём функцию $G(x, y, z, x', y')$, которая является решением уравнения Лапласа

$$\Delta_{x,y,z} G = 0, \quad (5)$$

где $\Delta_{x,y,z}$ – оператор Лапласа в декартовой си-

стеме координат, а x', y' – точки, принадлежащие области Π , при краевых условиях

$$\left. \frac{\partial G}{\partial x} \right|_{x=0, L_x} = \left. \frac{\partial G}{\partial y} \right|_{y=0, L_y} = 0, \quad G|_{z=L_z} = 0, \quad (6)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial G}{\partial z} \right|_{z=0} = \delta(x - x') \delta(y - y'), \quad (7)$$

где $\delta(x - x')(y - y')$ – дельта функция.

Применяя двойное преобразование Фурье по координатам x и y [4], находим

$$G = \frac{4}{\lambda L_x L_y} \sum_{n,m=1}^{\infty} \frac{q_{nm}}{\gamma_{nm}} \cdot \frac{\text{sh}(\gamma_{nm}(L_z - z))}{\text{ch}(\gamma_{nm} L_z)} \cdot \cos\left(\frac{n\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{m\pi y}{L_y}\right) + \frac{q_{00}}{\lambda} (L_z - z), \quad (8)$$

где

$$q_{nm} = \cos\left(\frac{n\pi x'}{L_x}\right) \cos\left(\frac{m\pi y'}{L_y}\right) \quad (n \neq 0, m \neq 0),$$

$$q_{0m} = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{m\pi y'}{L_y}\right),$$

$$q_{n0} = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{n\pi x'}{L_x}\right), \quad q_{00} = 1,$$

$$\gamma_{nm}^2 = \left(\frac{n\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L_y}\right)^2.$$

Температуру структуры $T(x, y, z)$ можно выразить через функцию G следующим образом:

$$T(x, y, z) = q \iint_{\Pi} G(x, y, z, x', y') dx' dy' +$$

$$+ (q_d - q) \iint_{\Pi_d} G(x, y, z, x', y') dx' dy'. \quad (9)$$

Подставляя в (9) выражение (8), для температуры поверхности кристалла (при $z=0$) получаем

$$T(x, y, 0) = \frac{16}{\pi^2 \lambda} \sum_{n,m=0}^{\infty} (A_{nm} q + A_{dnm} (q_d - q)) \cdot \text{th}(\gamma_{nm} L_z) \cos\left(\frac{n\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{m\pi y}{L_y}\right) + C(q, q_d) L_z, \quad (10)$$

где

$$A_{nm} = \frac{1}{nm\gamma_{nm}} \sin\left(\frac{n\pi l_x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{m\pi l_y}{L_y}\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi\xi}{L_x}\right) \cos\left(\frac{m\pi\eta}{L_y}\right) (n \neq 0, m \neq 0),$$

$$A_{n0} = \frac{\pi l_y}{2L_y} \frac{1}{n\gamma_{n0}} \sin\left(\frac{n\pi l_x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n\pi\xi}{L_x}\right),$$

$$A_{0m} = \frac{\pi l_x}{2L_x} \frac{1}{m\gamma_{0m}} \sin\left(\frac{m\pi l_y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{m\pi\eta}{L_y}\right),$$

$$C(q, q_d) = \frac{\Pi}{\lambda\Pi_0} \left(q + (q_d - q) \frac{\Pi_d}{\Pi} \right). \quad (11)$$

Коэффициенты A_{dnm} аналогичны коэффициентам A_{nm} , только величины l_x, l_y, ξ, η заменяются на соответствующие величины в дефектной области, с индексом d. В двойной сумме выражения (10) исключается член, когда $n=0$ и $m=0$ одновременно.

Для проведения численных расчётов, с учётом температурной зависимости плотности мощности, была выбрана планарно-эпитаксиальная структура мощных биполярных транзисторов с дефектом электрофизической природы в области эмиттера (рис. 2). При работе транзистора в нормальном активном режиме основная мощность выделяется в

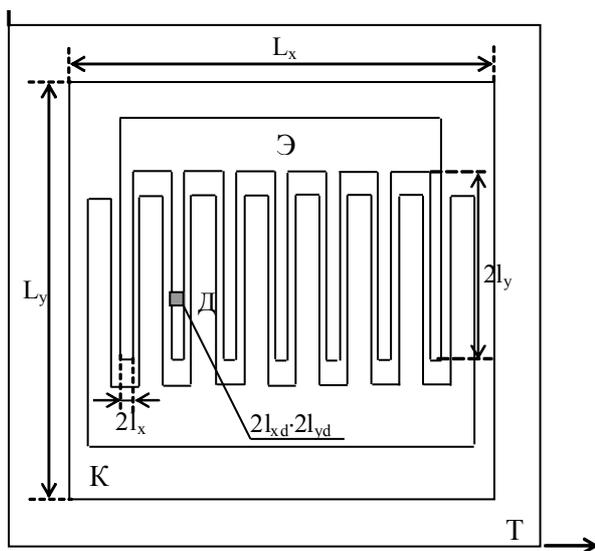


Рис.2. Схема поверхности планарной эпитаксиальной полупроводниковой структуры (К – кристалл, Э – эмиттер, Т – теплоотвод, Д – дефект): $L_x=L_y=2,4\text{мм}$; $L_z=0,2\text{мм}$; $l_x=0,1\text{мм}$; $l_y=1,2\text{мм}$; $T_1=300\text{К}$

коллекторном переходе. Коллекторный переход в таких структурах много тоньше пластины, расположен на глубине нескольких микрон от поверхности, поэтому источники тепла можно считать поверхностными, а распределение плотности потока тепла по площади активной области структуры совпадает с распределением плотности тока через эмиттерный p-n переход. Если пренебречь величиной обратного тока коллекторного перехода, то плотности токов можно представить в виде [1]

$$j_d(T) = B_d \exp\left\{-\frac{E_g - e(U_{эб} - \rho_{nd}j_d(T))}{kT_d}\right\}, \quad (12)$$

$$j(T) = B \exp\left\{-\frac{E_g - e(U_{эб} - \rho_n j(T))}{kT}\right\}, \quad (13)$$

где j, j_d – плотности токов через бездефектную и дефектную области эмиттерного p-n перехода соответственно; B и B_d – слабо зависящие от температуры параметры дефектной и бездефектной областей эмиттера, $U_{эб}$ – напряжение эмиттер-база, $\rho_{nd} \approx \rho_n = r_n \Pi$, E_g – ширина запрещённой зоны полупроводника, k – постоянная Больцмана. Используя условие постоянства полного входного тока для транзисторной структуры

$$I_0 = j(\Pi - \Pi_d) + j_d \Pi_d, \quad (14)$$

получаем нелинейную систему уравнений относительно j_d, j и $U_{эб}$.

Система уравнений (12)-(14), при неоднородном распределении температуры, определяемом выражением (10), решалась итерационным численным методом. На каждом последующем шаге итерации в выражении (10) подставлялись усреднённые плотности тепловых потоков по активной области структуры

$$q_d = \frac{1}{\Pi_d} \int_{\Pi_d} j_d(x, y) U_{кэ} dx dy,$$

$$q = \frac{1}{(\Pi - \Pi_d)} \int_{(\Pi - \Pi_d)} j(x, y) U_{кэ} dx dy, \quad (15)$$

где $U_{кэ}$ – напряжение коллектор-эмиттер, и по ним рассчитывались новые распределения температуры и плотности тока.

Геометрические размеры планарно-эпи-

таксиальной структуры указаны на рис. 2. Всего дорожек 8, с координатами расположения относительно поверхности пластины: $\xi=(0,6+0,5i)$ мм, где $i=0, \dots, 7$; $\eta=2,3$ мм. Размеры дефекта варьировались в пределах $l_{xd}=0,1$ мм, $l_{yd}=(0,1-0,5)$ мм. Полная мощность тепловыделения составляла $W_0=(10-20)$ Вт, коэффициент мощности $K_w=W_d/W=(0,02-0,07)$, где W, W_d – мощность тепловыделения на эмиттере и его дефектной части соответственно. В качестве полупроводникового материала выбирался Si.

На рис. 3 и 4 представлены неоднородные распределения температуры вдоль дорожки эмиттера без дефекта и с дефектом. Можно отметить, что уменьшение продольных размеров дорожки и увеличение коэффициента мощности K_w , приводит к возрастанию неоднородности распределения температуры и увеличению максимальной температуры активной области. При малых размерах области дефекта и при изменении его параметров, приводящему к возрастанию коэффициента мощности, из-за увеличения плотности теплового потока в области дефекта, максимальная температура может приближаться к критической (>400 К), даже при небольших общих мощностях тепловыделения. Влияние месторасположения дефекта в ак-

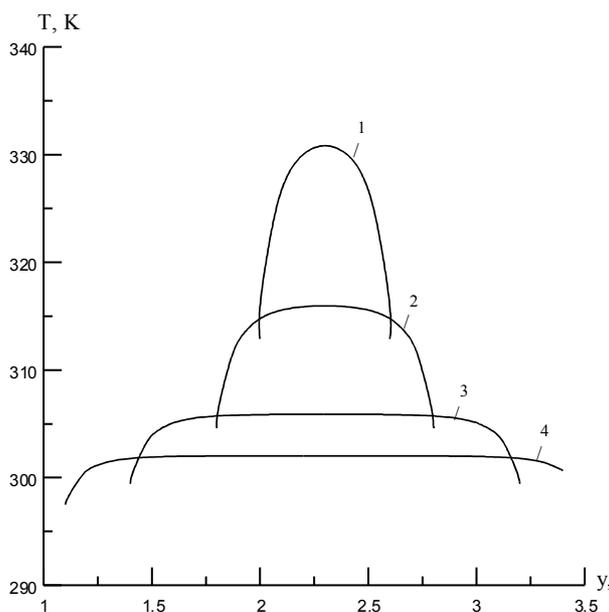


Рис. 3. Распределение температуры вдоль дорожки эмиттера без дефекта:
 $W=10$ Вт, $\xi=2,1$ мм, $\eta=2,3$ мм, $l_x=0,1$ мм,
 l_y : 1 – 0,3; 2 – 0,5; 3 – 0,9; 4 – 1,2 мм

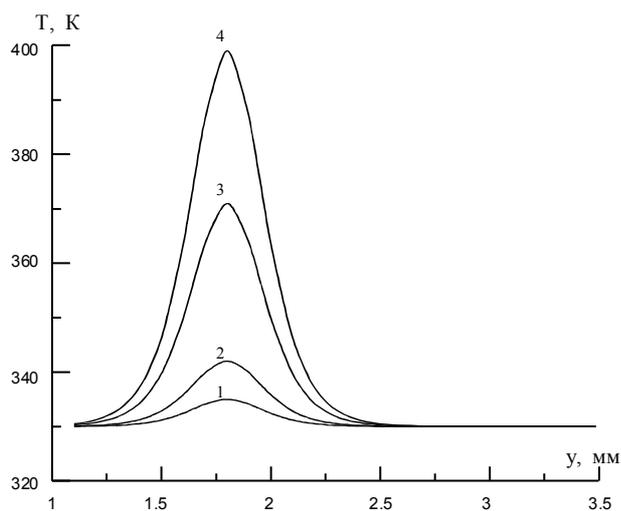


Рис. 4. Распределение температуры вдоль дорожки эмиттера с дефектом:
 $W_0=20$ Вт, $l_{xd}=0,1$ мм, $l_{yd}=0,2$ мм, $x_d=1,6$ мм, $h_d=1,8$ мм,
 K_w : 1 – 0,02; 2 – 0,03; 3 – 0,05; 4 – 0,07

тивной области структуры показано на рис. 5. Сдвиг области дефекта к центру структуры, при постоянной координате η_d , приводит к повышению максимальной температуры активной области на $4,5^\circ$ К, а при изменении координат геометрического центра (ξ_d, η_d) от (0,6;1,3) до (2,1;2,3), она повышается на 8° К. Форма кривых распределения плотности тока (рис. 6) подобна форме кривых распределения температуры (рис. 4). Как видно из

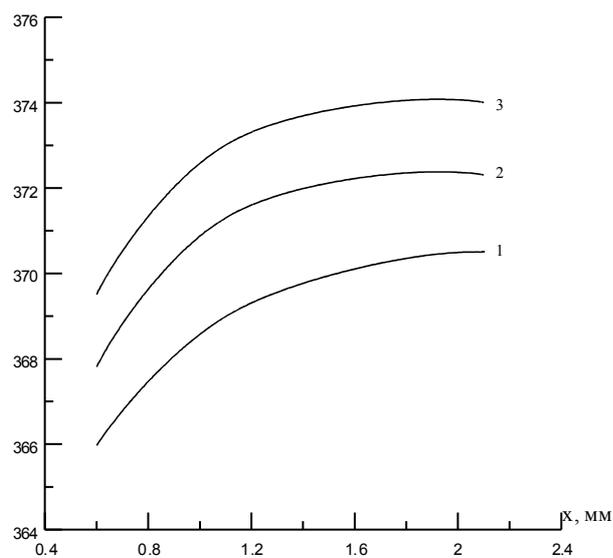


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры поверхности полупроводниковой структуры от положения дефекта:
 $W_0=20$ Вт, $l_{xd}=0,1$ мм, $l_{yd}=0,2$ мм, $K_w=0,05$;
 η_d : 1 – 1,3; 2 – 1,8; 3 – 2,3 мм

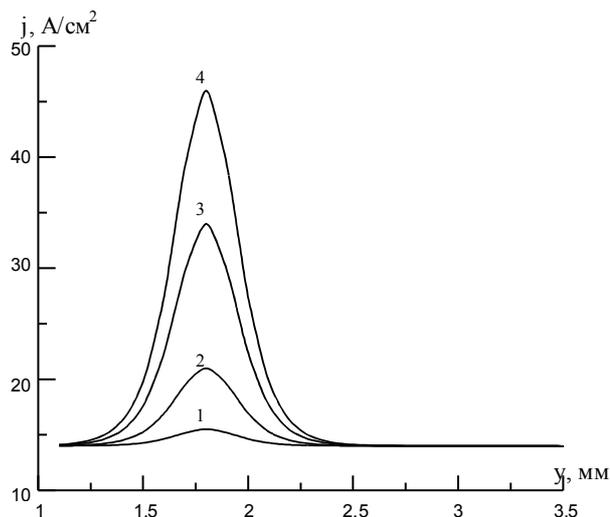


Рис. 6. Распределение плотности тока вдоль дорожки эмиттера с дефектом:
 $W_0=20$ Вт, $l_{xd}=0,1$ мм, $l_{yd}=0,2$ мм, $\xi_{cd}=1,6$ мм, $\eta_d=1,8$ мм,
 K_w : 1 – 0,02; 2 – 0,03; 3 – 0,05; 4 – 0,07

графика, значение максимальной плотности тока в области дефекта возрастает в 3 раза, при изменении коэффициента мощности от 0,02 до 0,07.

По зависимости максимальной температуры поверхности полупроводниковой структуры от коэффициента мощности (рис. 7), можно оценить термонапряжения, которые возникают в кристалле прибора в результате неравномерности распределений рассмот-

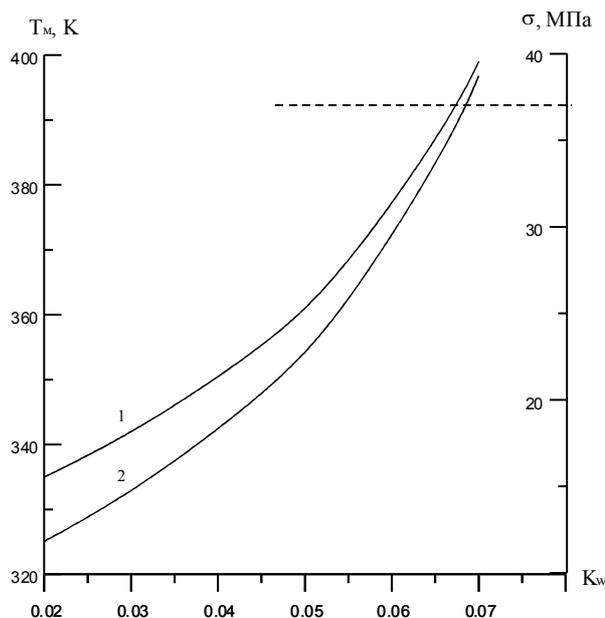


Рис. 7. Зависимость максимальной температуры поверхности (1) и нормальных напряжений (2) полупроводниковой структуры от коэффициента мощности
 $W_0=20$ Вт, $l_{xd}=0,1$ мм, $l_{yd}=0,3$ мм, $\xi_{cd}=1,6$ мм, $\eta_d=1,8$ мм

ренных теплоэлектрических величин. Наиболее опасными точками кристалла, с точки зрения механических термонапряжений являются точки внешней поверхности пластины, так как источники тепла расположены вблизи неё. Для оценки нормальных механических напряжений σ в точке поверхности кристалла, где температура достигает своего максимального значения, определим среднюю температуру поверхности кристалла следующим образом

$$\bar{T}(x, y, 0) = \frac{1}{L_x L_y \Pi_0} \iint T(x, y, 0) dx dy \quad (16)$$

Подставляя в интеграл выражение (10), получим

$$\bar{T}(x, y, 0) = C(q, q_d) \cdot L_z, \quad (17)$$

где коэффициент $C(q, q_d)$ определяется формулой (11). Тогда будем иметь

$$\begin{aligned} \sigma &= E\alpha [T_m - \bar{T}(x, y, 0)] = \\ &= E\alpha [T_m - C(q, q_d)L_z], \end{aligned} \quad (17)$$

где T_m максимальная температура поверхности кристалла; E – модуль Юнга, α – коэффициент линейного теплового расширения. Комплекс $E\alpha = 0,42$ МПа/К [5]. На рис. 7 представлена зависимость величины термонапряжения от коэффициента мощности. Пунктирной линией показан предел прочности кремния $\sigma_b = 37$ МПа [6].

Заключение

В результате аналитического решения стационарной задачи теплопроводности получены выражения для неравномерного трёхмерного распределения температуры по активной области поверхности прямоугольной полупроводниковой структуры, находящейся на идеальном теплоотводе. В качестве примера, проведены расчёты температуры и плотностей токов для биполярных транзисторных структур с эмиттерами полосковой геометрии, при рассеивании постоянной мощности и наличии неоднородности инжекционного типа в активной области. В процессе проведения последних, численно решена нелинейная система уравнений, которая связывает величины плотностей токов и температуру в рассматриваемой структуре. Пред-

лагаемая модель позволила оценить характер влияния коэффициента мощности K_w и местоположения дефекта в области эмиттера на неоднородные распределения температуры и плотности тока, а также на максимальную температуру активной области. Отмечено, что при увеличении коэффициента мощности от 0,02 до 0,07, наблюдается возрастание максимальной плотности тока в области дефекта в 3 раза. Сдвиг геометрического центра дефекта от края активной области к её центру, приводит к повышению максимальной температуры активной области на 8° К. По приведённым оценкам термонапряжений, возникающих в подобных структурах, можно определить теплоэлектрические условия работы полупроводниковых приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нечаев А.М., Рубаха Е.А., Синкевич В.Ф.* Тепловое шнурование в транзисторных структурах с неоднородностью // Радио-техника и электроника. 1981. №8.
2. *Абдурахманов К.П., Квурт А.Я., Миндлин Н.Л. и др.* Исследование переходных тепловых характеристик транзисторных структур с дефектами // Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы. 1982. Вып. 5 (156).
3. *Zhou W., Sheu S., Liou J.J., Huang C.I.* Analysis of non-uniform current and temperature distribution in the emitter finger of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors // Solid-State Electronics. 1996. Vol. 39. No. 12.
4. *Янке Е., Эмде Ф.* Интегральные преобразования. М.: ИЛ, 1959.
5. *Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А.* Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1982.
6. *Захаров Н.П., Кузнецов О.А., Летягин В.А., Сергеев В.С.* Напряжения и деформации в элементах микросхем. М.: Радио и связь, 1987.

DISTRIBUTION OF A CURRENT DENSITY AND TEMPERATURE IN BIPOLAR TRANSISTOR STRUCTURES WITH DEFECTS IN ACTIVE AREA

© 2005 A.M. Hodakov

Ulyanovsk Branch of Institute of Radio Engineering and Electronics
of Russian Academy of Sciences

Is adduced thermal electric model and the analytical expressions for stationary non-uniform distributions of a current density and temperature in bipolar transistor structures with emitters of strip-geometry are obtained at dispersion of constant power and availability of a non-uniformity of an injected type in an active area of structure. The algorithm of a numerical solution of a problem with allowance for of temperature dependence of a power density in defective and indefective areas of structure is offered. The relations of a maximum current density and temperature from parameters and position of a non-uniformity are submitted. The estimation of the thermal stresses arising in similar structures is made.