

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ ТЕПЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ МОЩНЫХ БИПОЛЯРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

© 2013 В.А. Сергеев, А.М. Ходаков

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

Поступила в редакцию 29.04.2013

В данной статье рассмотрена математическая тепловая модель мощного биполярного полупроводникового прибора с учетом различных механизмов теплоэлектрической обратной связи, действующих в приборной структуре. На её основе разработаны тепловые модели мощного биполярного транзистора и светоизлучающего диода. Численно-аналитическим итерационным методом решена система модельных уравнений и рассчитаны распределения плотности тока и температуры активной области полупроводниковых структур. Получено хорошее соответствие расчётных и экспериментальных зависимостей тепловых сопротивлений переход-корпус от величины рассеиваемой мощности для конкретных типов мощного транзистора и светодиода.

Ключевые слова: математическая тепловая модель, теплоэлектрическая обратная связь, тепловое сопротивление, светоизлучающий диод, биполярный транзистор.

ВВЕДЕНИЕ

Теплоэлектрические процессы в полупроводниковых структурах полупроводниковых приборов (ППП) являются важным фактором, определяющим функциональные свойства, предельные режимы работы и надежность ППП. Выделение электрической мощности в активной области структуры ППП приводит к ее разогреву. Следует отметить, что особенностью ППП, усложняющей их тепловое моделирование, является неоднородность исходного распределения источников тепла в приборной структуре и действие различных механизмов тепловой обратной связи в структурах прибора, которые приводят к перераспределению источников тепла в структуре в результате саморазогрева. Наиболее сильно и опасно эти эффекты проявляется в мощных биполярных ППП, в которых действует положительная тепловая обратная связь, приводящая к возрастанию локальных перегревов структуры. При определенных условиях из-за положительной обратной связи распределение плотности тока в структурах биполярных ППП может потерять устойчивость, что приводит к “шнурованию” тока в приборной структуре.

Тепловое моделирование и расчётные исследования мощных биполярных ППП проводилось многими отечественными (Н.М. Ройзин, В. Л. Аронов, Б.К. Петров, Н. Н. Горюнов, В. Ф. Синкевич, К. О. Петросянц, А. Н. Бубенников и др.) и зарубежными (F Oettinger, H. Navon, R. Marani,

V. Benbakhti, N. Rinaldi и др.) специалистами. В этих математических моделях токораспределение в приборной структуре полагалось температурнезависимым, а температурные поля находились без учёта перераспределения в процессе работы прибора расположенных в активной области источников тепла [1-5]. Температурная зависимость плотности рассеиваемой структурой мощности вызвана действием различных механизмов положительной тепловой обратной связи (ПТОС), по этой причине зависимости максимальной и средней температуры $p-n$ перехода от электрической мощности становятся нелинейными и тепловое сопротивление переход-корпус $R_{T_{j-c}}$ прибора нелинейно растет с увеличением электрической мощности [5-8]. Недооценка этого факта приводит к заниженным значениям максимальной температуры $p-n$ перехода и переоценке предельных энергетических возможностей ППП. Следует также отметить, что в большинстве случаев тепловое моделирование свойств мощных биполярных ППП проводилось в 1D и 2D приближениях. Подобные модели не позволяли получить адекватную картину распределений температуры и плотности тока по структуре в условиях интенсивного тепловыделения, являющегося причиной существенной неоднородности плотности мощности и значительных градиентов температур в структурах полупроводникового прибора и приводящих в результате к разрушению структуры и контактных соединений.

Чаще всего задачи переноса тепла в ППП решались численными методами, которые требовали значительных затрат машинного времени. 3D МТМ, в основном, были основаны на принципе теплоэлектрической аналогии. В тепловых моде-

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, директор. E-mail: ufire@mc.ru; swa@ulstu.ru
Ходаков Александр Михайлович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. E-mail: ln23al@yandex.ru

лях с аналитическим решением задачи теплопереноса в приборной структуре, из-за сложности полученных выражений для температурного распределения по структуре прибора, обратные преобразования и получение оригинала делались после дополнительных упрощений первоначально поставленной задачи, что значительно снижало ценность полученных решений. В ряде моделей применялись пакеты прикладных программ для моделирования тепловых режимов приборных структур (SPICE, TERM3, ANSYS, COMSOL и др.). С помощью этих пакетов программ можно рассчитывать температурные поля при заданном распределении источников тепла и граничных условиях, но они не позволяют без дополнительных программ непосредственно учесть перераспределение источников тепла по активной области гетероструктуры в результате действия в структурах мощных биполярных ППП различных механизмов теплоэлектрической обратной связи. Например, при построении тепловой модели светоизлучающего диода особенно важно учитывать влияние величины квантовой эффективности на степень неоднородности распределений плотности тока и температуры по площади активной области гетероструктуры [8]. Другой причиной, приводящей к нелинейной зависимости теплового сопротивления переход-корпус от полного тока, является зависимость коэффициентов теплопроводности материалов структуры прибора от температуры [6].

Разработка трёхмерных математических тепловых моделей многослойной конструкции мощных биполярных ППП с учетом действия указанных выше механизмов положительной тепловой обратной связи, а также проведение на основе этой модели расчётных исследований стационарных распределений плотности тока и температуры в конкретных структурах мощных биполярных транзисторов (МБТ) и светоизлучающих диодов (СИД) являлось целью представляемой работы.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ МОЩНОГО БИПОЛЯРНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА

Структура мощного биполярного ППП представляется в виде многослойной системы, каждый i -й слой которой характеризуется теплофизическими параметрами c_i, ρ_i, λ_i . Верхним слоем является полупроводниковая пластина, нижним – корпус прибора (теплоотвод). Как правило, глубина залегания рабочей области p - n перехода от верхней поверхности кристалла много меньше толщины полупроводниковой подложки, поэтому предполагается, что источники тепла расположены на верхней поверхности кристалла

и занимают активную область площадью S_{ar} . В температурозависимом приближении плотность рассеиваемой структурой мощности зависит от температуры активной области, то есть $q_{ar}(T_{ar}(\bar{r}))$. Температуру нижней поверхности корпуса прибора считаем равной температуре окружающей среды T_0 .

С учетом сделанных выше предположений, стационарное уравнение теплопроводности и граничные условия имеют вид:

1. Уравнение теплопроводности

$$\operatorname{div}(\lambda(T_i)\operatorname{grad}T_i) = 0, \quad \bar{r} \in \Omega_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, I, \quad (1)$$

где Ω_i – пространственные области, которые определяются следующим образом:

– для элементов структуры прямоугольной формы $r = r(x, y, z)$,

$$(x, y, z) \in \Omega_i = \{(x, y, z) : 0 < x < L_{xi},$$

$$0 < y < L_{yi}, L_{z(i-1)} < z < L_{zi}\}; \quad (2)$$

– для элементов структуры цилиндрической формы $r = r(r, \varphi, z)$,

$$(r, \varphi, z) \in \Omega_i = \{(r, \varphi, z) : 0 \leq r < R_i,$$

$$0 \leq \varphi \leq 2\pi, L_{z(i-1)} < z < L_{zi}\}; \quad (3)$$

I – количество элементов в структуре; $T_i = T_{li} - T_0$; T_{li} – температура i -го слоя структуры; $L_{xi}, L_{yi}, L_{zi}, R_i$ – характерные размеры элемента структуры.

2. Граничные условия на внешних поверхностях структуры:

– на верхней поверхности полупроводниковой структуры ($i = 1$)

$$\lambda_I(T_{1l}) \frac{\partial T_I(\bar{r})}{\partial n} = \begin{cases} q_{ar}(\bar{r}), \bar{r} \in G_{ar} \\ 0, \bar{r} \in (G_0 - G_{ar}) \end{cases}, \quad (4)$$

где G_0, G_{ar} – области, занимаемые верхней поверхностью кристалла и активной его частью; \bar{n} – вектор внешней нормали к поверхностям структуры.

– на нижней поверхности структуры ($i = I$)

$$\lambda_I(T_I) \frac{\partial T_I(\bar{r})}{\partial n} + \alpha T_I(\bar{r}) = 0, \quad \bar{r} \in G_{ls}, \quad (5)$$

где G_{ls} – область нижней поверхности структуры, λ_I – коэффициент теплопроводности теплоотвода, α – коэффициент конвективного теплообмена с окружающей средой;

– на боковых поверхностях структуры

$$\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i(\bar{r})}{\partial n} + \alpha T_i(\bar{r}) = 0,$$

$$\bar{r} \in G_{jfi}, \quad (6)$$

где G_{jfi} – область боковой поверхности i -го слоя структуры.

3. Условия сопряжения на границах контакта двух сред ($i > 1, r \in \Gamma_{ci}$):

$$\lambda_{i-1}(T_{i-1}) \frac{\partial T_{i-1}(\bar{r})}{\partial n} = \lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i(\bar{r})}{\partial n}; \quad (7)$$

$$T_i(\bar{r}) - T_{i-1}(\bar{r}) = 0, \quad (8)$$

где Γ_{ci} – внутренние границы области.

Зависимость плотности мощности от температуры активной области определяется из уравнения электротепловой обратной связи. Для базовых приборных структур определение плотности рассеиваемой мощности при заданном режиме включения ППП в электрическую цепь обычно сводится к расчёту плотности токов и потенциала по уравнениям вольтамперных характеристик приборов [9]. Тогда плотность тепловой мощности находится в результате решения трансцендентного уравнения [10, 11], которое можно записать в общем виде следующим образом

$$q_{ar}(T_{ar}(\bar{r})) = A \exp\left\{-\frac{(D+B q_{ar}(T_{ar}(\bar{r})))}{k_B T_{ar}(\bar{r})}\right\}, \quad (9)$$

где A, B, D – коэффициенты, зависящие от электрофизических характеристик полупроводниковой структуры конкретного полупроводникового прибора; k_B – постоянная Больцмана.

При этом необходимо чтобы выполнялось условие включения прибора во внешнюю электрическую цепь, то есть соблюдалось сохранение постоянства значения некоторой физической величины, характеризующей заданный режим работы прибора

$$VAL = const, \quad (10)$$

где VAL – сохраняемая физическая величина (потребляемая прибором электрическая мощность, сила тока и т.д.).

Температурное поле в структуре ППП находится путем решения системы нелинейных уравнений (1) и (9), с граничными условиями (2) – (8) при ограничении (10).

2. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА И ТЕМПЕРАТУРЫ В СТРУКТУРЕ МОЩНОГО ВЧ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

На рис. 1 представлена геометрия модели высокочастотного мощного биполярного транзистора (МБТ) с многоэмиттерной полупроводниковой структурой. Конструкция такого МБТ представляет собой трёхслойную систему [12]: 1 – прямоугольный полупроводниковый кристалл, с размерами $L_{x1} \times L_{y1} \times L_{z1}$; 2 – термокомпенсирующая цилиндрическая пластина радиусом R_2 и толщиной L_{z2} ; 3 – неидеальный теплоотвод (основание корпуса) с конечной теплопроводностью и размерами $L_{x3} \times L_{y3} \times L_{z3}$. Источники тепла расположены на верхней поверхности кристалла и занимают активную область площадью $S_{ar} = F \cdot l_{fx} \cdot l_{fy}$, где l_{fx}, l_{fy} – размеры полосок эмиттера по осям x и y соответственно, а F – число полосок эмиттера. На верхней поверхности кристалла за пределами активной области и на боковых поверхностях структуры заданы адиабатные граничные условия:

$$\frac{\partial T_i(\bar{r})}{\partial n} = 0. \quad (11)$$

Температура нижней поверхности корпуса равна температуре окружающей среды T_0

$$T_3(\bar{r}) = 0. \quad (12)$$

Для данного типа прибора уравнение тепло-электрической обратной связи (9) имеет вид:

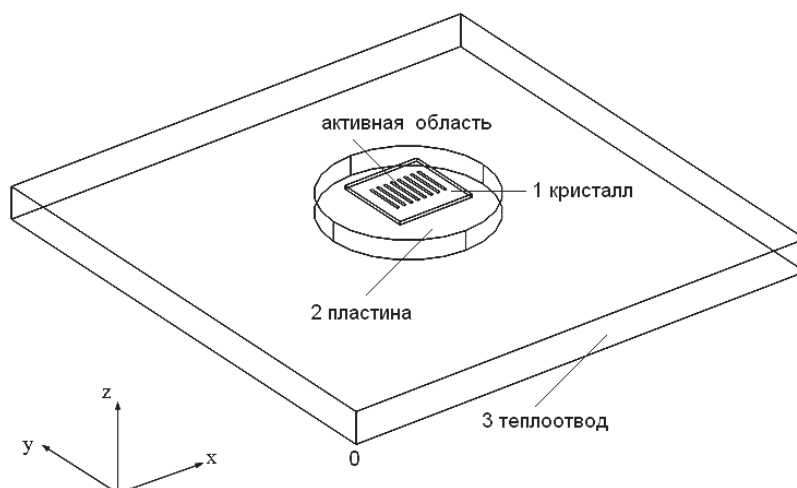


Рис. 1. Геометрия структуры МБТ

$$q_{ar}(T_{11}) = U_{cb} \cdot J_{e0} \exp \left\{ - \frac{(E_g - eU_{eb} + e\rho U_{cb}^{-1} q_{ar}(T_{11}))}{k_B T_{11}} \right\}, \quad (12)$$

где U_{cb}, U_{eb} – напряжения коллектор-база и эмиттер – база соответственно; $\rho = r S_{ar}$, r – входное сопротивление транзистора; E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника; J_{e0} – слабо зависящий от температуры параметр; e – заряд электрона; k_B – постоянная Больцмана; температура T_{11} определяется в активной области структуры.

В качестве условия (10) будем рассматривать условие постоянства выделяемой в структуре МБТ тепловой мощности:

$$W_0 = \iint_{S_{ar}} U_{cb} \cdot J_e(x, y) ds = const. \quad (13)$$

Распределения плотности тока и температуры в структуре прибора находились численным методом с использованием итерационного алгоритма и обращения к программной среде COMSOL Multiphysics. Комплексная программа по расчёту поля температуры в МБТ аналогична программе [13], учитывающей действие ПТОС в структуре. Зависимости коэффициентов теплопроводности кристалла полупроводника и термокомпенсирующей пластины от температуры взяты из библиотеки моделирующей среды COMSOL.

В качестве расчетного примера рассмотрена структура с геометрическими размерами: $L_{x1} = L_{y1} = 0.005$ м, $L_{z1} = 1.5 \cdot 10^{-4}$ м, $l_{fx} = 1.5 \cdot 10^{-4}$ м, $l_{fy} = 0.0024$ м, $F = 8$, $R_2 = 0.0048$ м, $L_{z2} =$

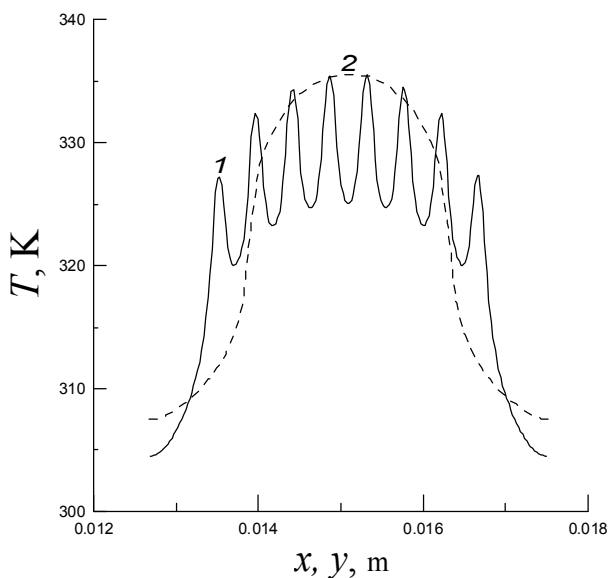


Рис. 2. Температурные распределения по верхней поверхности кристалла:

1 – по оси x ($y = 0.015$ м); 2 – по оси y ($x = 0.0148$ м); материал пластины – ВеО; теплоотвод – Си; $P = 30$ Вт

0.0015 м, $L_{x3} \times L_{y3} \times L_{z3} = 0.03 \times 0.03 \times 0.002$ м; с кристаллом из Si, пластиной из ВеО и корпусом из меди ($\lambda_3 = 400$ Вт/м К).

На рис. 2 и 3 показаны распределения температуры верхней поверхности кристалла и плотности тока в центральных сечениях структуры по оси x ($y = 0.015$ м) и y ($x = 0.0148$ м), там, где температура кристалла принимает максимальное значение.

В результате расчетов при различных значениях рассеиваемой мощности показано, что измеряемый тепловой параметр МБТ тепловое сопротивление переход-корпус $R_{T_{j-c}}$ определяемое по формуле $R_{T_{j-c}} = (\bar{T} - T_0) / P$, где \bar{T} – средняя температура активной области, нелинейно возрастает при увеличении разогревающей мощности (рис. 4, кривая 2). При этом крутизна зависимости $R_{T_{j-c}}(P)$ при изменении коллекторного напряжения при постоянном токе $I_c = const$ определяется степенью теплоэлектрической обратной связи. На этом же рисунке приведены экспериментальные зависимости $R_{T_{j-c}}(P)$ для двух образцов данного типа транзистора, взятые из работы [14]. Полученные результаты подтверждают хорошее соответствие расчетных и экспериментальных зависимостей и заключение о характере зависимости теплового сопротивления переход-корпус, обусловленное действием ПТОС.

3. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА И ТЕМПЕРАТУРЫ В СТРУКТУРЕ МОЩНОГО СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕГО ДИОДА

Особенностью гетеропереходных СИД является то, что эффективность светодиода с ростом

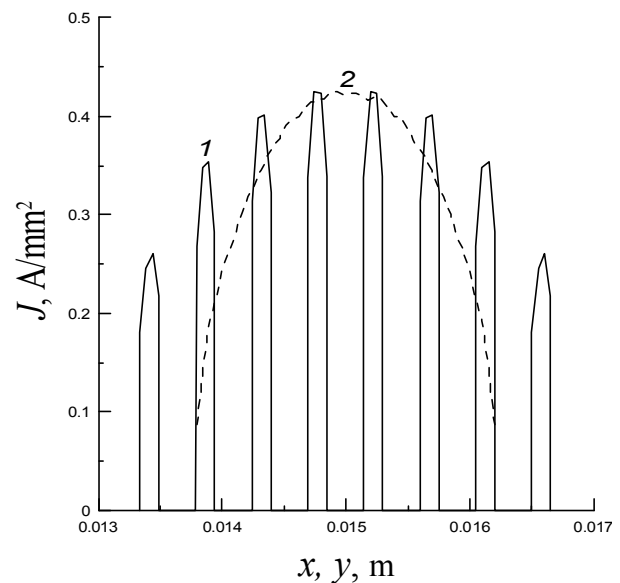


Рис. 3. Плотность тока активной области МБТ: 1 – по оси x ($y = 0.015$ м); 2 – по оси y ($x = 0.0148$ м); материал пластины – ВеО; теплоотвод – Си; $P = 30$ Вт

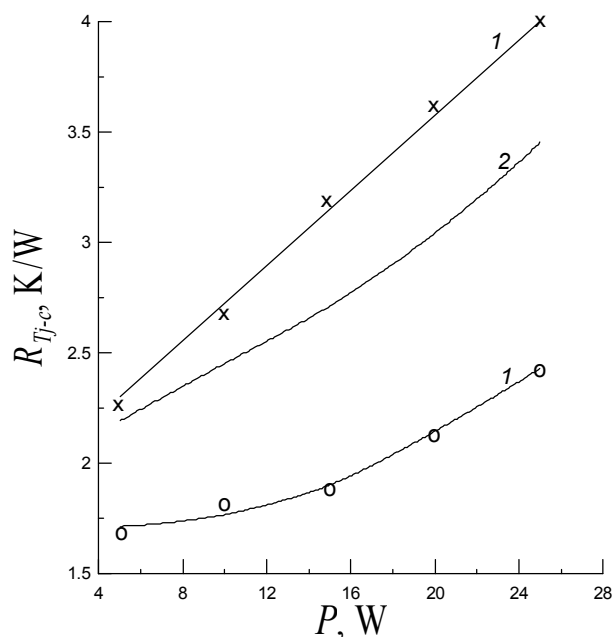


Рис. 4. Зависимость теплового сопротивления МБТ КТ903А от рассеиваемой мощности: 1 – эксперимент; 2 – МТМ МБТ; $I_c = 1A$

температуры и плотности тока уменьшается [15], что приводит к дополнительной положительной электротепловой обратной связи. Тогда уравнение теплоэлектрической обратной связи (9) для структуры СИД будет следующим

$$q(x, y) = U_D \cdot [1 - \eta(T_{II}, J)] \cdot J_0 \exp\left(-\frac{E_g - e(U_D - r S_{ar} J(T_{II}))}{pk_B T_{II}}\right), \quad (14)$$

где J_0 – слабо зависящий от температуры параметр, U_D – прямое падение напряжения на СИД, E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника, T_{II} – температура структуры в плоскости гетероперехода, r – сопротивление гетероструктуры, p – параметр, зависящий от механизма токопереноса в гетеропереходе, η – эффективность светодиода.

В качестве ограничения (10) рассмотрим условие постоянства полного тока, протекающего через СИД, реализуемое в большинстве практических схем

$$I_D = \iint_{S_{ar}} J(x, y) dx dy = const. \quad (15)$$

Согласно представленных в работах [15, 16] результатов исследований зависимости эффективности светодиодов от режимов работы СИД, функция $\eta(T_{II}, J)$ представлялась в следующем виде:

$$\eta(T, J) = \eta_0(T_0, J_0) \exp(-A\Delta T - B\Delta J), \quad (16)$$

где ΔT , ΔJ – отклонения температуры и плотности тока активной области от начальных значений T_0 и J_0 . Параметры A , B и η_0 определялись по экспериментальным данным

Геометрия МТМ гетеропереходного мощного светоизлучающего диода представлена на рис. 5. Как и в предыдущей МТМ мощного биполярного транзистора, толщина и глубина залегания гетероперехода считались малыми по сравнению с толщиной подложки, поэтому источники тепла полагались поверхностно распределенными, а на верхней поверхности, а на боковых границах структуры СИД задавались адиабатные условия теплообмена.

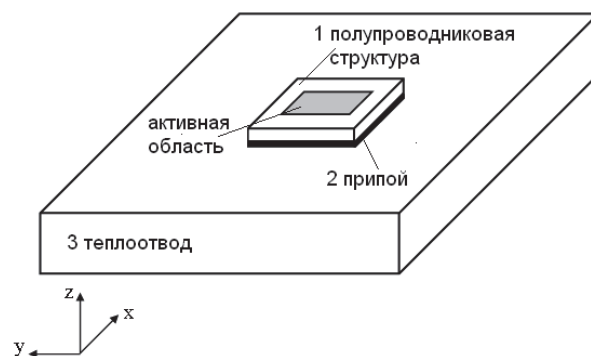


Рис. 5. Геометрия структуры СИД

В качестве примера для проверки модели рассмотрена структура мощного СИД типа XRC-RED-L1-R2-M2-C-1 фирмы CREE. Геометрические параметры структуры определялись согласно [17] и составляли: $L_{x1} = L_{y1} = 680$ мкм, $S_{ar} = 640 \times 640$ мкм², $L_{z1} = 170$ мкм, а коэффициент теплопроводности $\lambda_1 = 330$ Вт/м·К. Аналогично предыдущему решению задачи теплопереноса в структуре МБТ, распределения плотности тока и температуры по структуре СИД найдены численным итерационным методом с обращением к моделирующей среде COMSOL Multiphysics.

На рис. 6 и 7 показаны распределения температуры верхней поверхности кристалла и плотности тока по оси x ($y = 0.034$ м), там где температура кристалла принимает максимальное значение. На рис. 8 также показаны результаты измерения теплового сопротивления серийных мощных СИД выше указанного типа и расчёта по предложенной модели.

Измерения тепловых параметров СИД проводились при помощи микроконтроллерного измерителя теплового импеданса диодов [18]. Видно, что между экспериментальными и расчётными зависимостями $R_{Tj-c}(I)$ наблюдается удовлетворительное соответствие. Разница в количественных

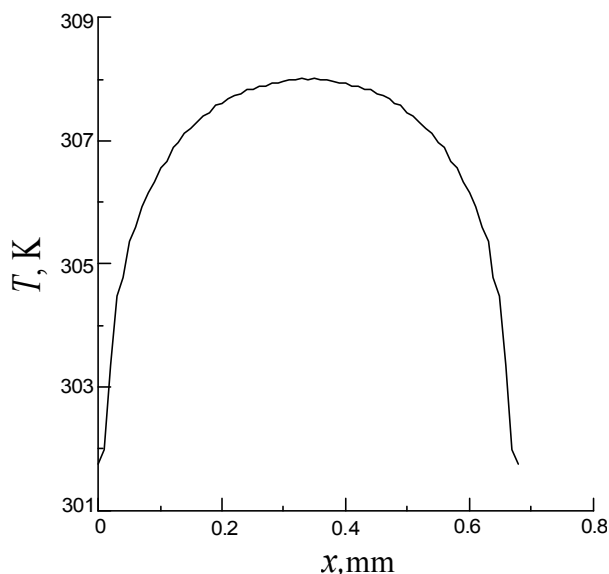


Рис. 6. Температура активной области СИД:
 $y = 0.34$ мм; $I_D = 0.55$ А

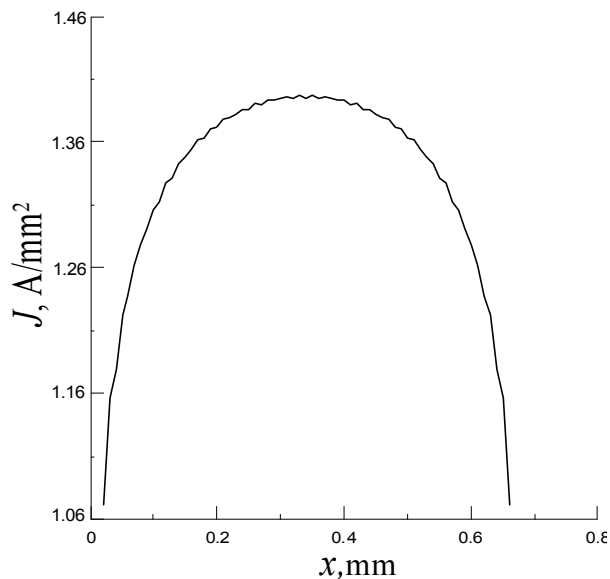


Рис. 7. Плотность тока активной области СИД:
 $y = 0.34$ мм; $I_D = 0.55$ А

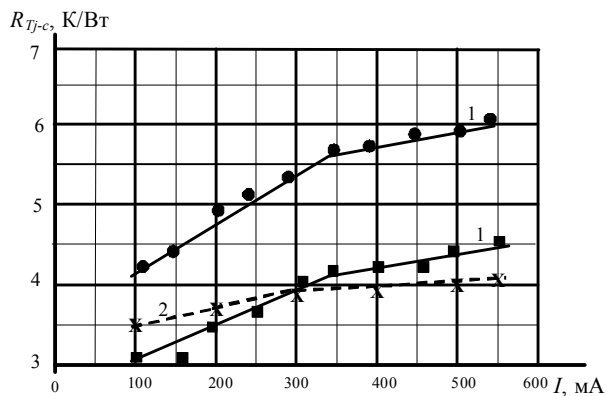


Рис. 8. Токсовая зависимость теплового сопротивления мощного СИД:
 1 – эксперимент; 2 – МТМ СИД

результатах вызвана неточностью определения исходных данных геометрических и теплофизических характеристик реальной структуры СИД. Крутизна токовой зависимости R_{Tj-c} на начальном участке может быть использована для оценки токовой и температурной зависимости эффективности СИД и неоднородности распределений плотности тока и температуры в структуре.

4. ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ФУНКЦИИ ПЛОТНОСТИ РАССЕИВАЕМОЙ СТРУКТУРОЙ ППП МОЩНОСТИ

В работе [19] показано, что в случае сделанного в пункте 1 настоящей работы предположения о глубине залегания рабочей области $p-n$ перехода от верхней поверхности кристалла, при обычных режимах работы ППП (низких температурах перегрева активной области), функцию плотности мощности (9) можно рассматривать в линейном приближении относительно величины

$\Delta T_{ar} = T_{ar} - \overline{T_{ar}}$. В общем случае, исходя из вида представленных на рис. 6 и 7 распределений температуры и плотности тока, в качестве приближающей функции для плотности мощности выберем алгебраический полином вида:

$$\frac{q_{ar}^P(\Delta T_{ar}(\bar{r}))}{q_{av}} = \sum_{k=0}^n a_k \left(\frac{\Delta T_{ar}(\bar{r})}{T_{ar}} \right)^{n-k}, \quad (17)$$

где q_{av} – изотермическое распределение плотности мощности при средней температуре $\overline{T_{ar}}$ активной области, a_k – коэффициенты разложения.

Выбор конкретного значения n определяется требуемой точностью аппроксимирования, определяемой как:

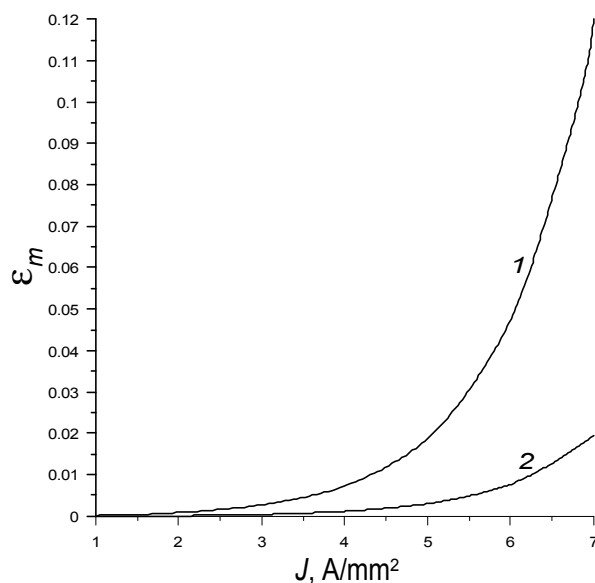


Рис. 9. Максимальная ошибка аппроксимации (1 – $n=1$, 2 – $n=2$) от плотности тока, протекающего через СИД

$$\varepsilon = \left(\frac{|q_{ar}(\Delta T_{ar}(\bar{r})) - q_{ar}^P(\Delta T_{ar}(\bar{r}))|}{q_{ar}(\Delta T_{ar}(\bar{r}))} \right) \quad (18)$$

Для рассматриваемой в предыдущем пункте модели прямоугольной структуры СИД, зависимость максимального значения ε от плотности тока и порядка полинома n аппроксимации представлена на рис. 9.

ВЫВОДЫ

Рассмотренные в статье математические модели теплоэлектрических процессов в биполярных ППП с учетом различных механизмов положительной тепловой обратной связи позволяют более адекватно оценить степень неоднородности распределения плотности тока, мощности и температуры и определить максимальные значения указанных величин в приборных структурах. Адекватность большинства развитых тепловых моделей подтверждена экспериментально. Приведенные в работе расчётные и экспериментальные зависимости величины теплового сопротивления переход-корпус мощного биполярного транзистора и светоизлучающего диода подтверждают сделанные предположения о нелинейном характере зависимостей $R_{T, i-\varepsilon}$ от рассеиваемой прибором мощности и плотности тока. Значительная часть разработанных нелинейных тепловых моделей может составлять основу неразрушающих методов и средств контроля качества мощных биполярных транзисторов и гетеропереходных светодиодов по теплофизическим характеристикам, а разработанные подходы к моделированию теплоэлектрических процессов в ППП и конкретные расчетные результаты могут быть применены в целях дальнейшего поиска конструктивно-топологических вариантов и путей совершенствования ППП, расширения их предельных режимов работы и повышения надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Transient Electrothermal Simulation of Power Semiconductor Devices / Bin Du Hudgins, J.L. Santi, E. Bryant // IEEE Transactions on power electronics. 2010. Vol. 25. № 1. P. 237-248.
2. Implementation of an 2D Electro- Thermal Model for Power. Semiconductor Devices Simulation : Application on Gallium Nitride / B. Benbakhti, M. Rousseau, J.C. De Jaeger // Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Multiphysics User's Conference, Paris. 2005. P. 8-10.
3. Analytical modeling and numerical simulations of the thermal behavior of bipolar transistors / I. Marano, V. d'Alessandro, N. Rinaldi // Solid-State Electronics. 2009. Vol. 53. P. 297-307.
4. Transient thermal simulation of a power hybrid module using an analytical solution of heat equation / G. De Mey, M. Janicki, A. Napieralski // 11-th International Workshop on Thermal Investigation of ICs and Systems. Belgirate, Italy. 2005. P. 112-118
5. McAlister S.P., Lafontaine H. Self-heating in multi-emitter SiGe HBTs // Solid-State Electronics. 2004. Vol. 48, № 6. P. 2001-2006.
6. Marani, R., Perri A.G. Analytical Electrothermal Modelling of Multilayer Structure Electronic Devices // The Open Electrical & Electronic Engineering Journal. 2010. №4. P. 32-39.
7. Расчет стационарных тепловых полей в структурах мощных транзисторов / Н.А. Козлов, А.М. Нечаев, В.Ф. Синкевич // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 1989. Вып.1 (198). С. 19-24.
8. Сергеев В. А., Ходаков А.М. Нелинейная тепловая модель гетеропереходного светодиода // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. Вып. 5. С. 691-694.
9. Конструкции корпусов и тепловые свойства полупроводниковых приборов [под общей ред. Н.Н. Горюнова] М.: Энергия, 1972. 120 с.
10. Ходаков А. М. Распределение плотности тока и температуры в биполярных транзисторных структурах с дефектами в активной области // Известия Самарского научного центра РАН. 2005. Т. 7. № 2. С. 352-357.
11. Analysis of non- uniform current and temperature distribution in the emitter finger of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors / W. Zhou, S. Sheu, J.J. Liou // Solid State Electronics. 1996. Vol. 39. P. 1709-1721.
12. Никишин В.И., Петров Б.К., Сыновров В.Ф. и др. Проектирование и технология производства мощных СВЧ-транзисторов. М.: Радио и связь, 1989. 144 с.
13. Ходаков А.М., Сергеев В.А. Комплексная программа моделирования и расчёта температурных полей в биполярных осесимметричных структурах полупроводниковых изделий с температурозависимой плотностью мощности // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010615259. Бюллетень "Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем". 2010. №4. С. 239.
14. Сергеев В.А. Контроль качества мощных транзисторов по теплофизическим параметрам. Ульяновск: УЛГТУ, 2000. 256 с.
15. Performance of high-power AlInGaN light emitting diodes / A.Y. Kim, W. Gotz, D.A. Steigerwald // Phys. Status Solidi A. 2001. Vol. 188. № 1. P. 15-21.
16. Poppe A., Lasance J.M. On the standardization of thermal characterization of LEDs Part II: Problem definition and potential solutions // Proc. 14th THERMINIC, Rome, Italy. 2008. P. 213-219.
17. Cree XLamp XR-C LED Data Sheet. URL: <http://www.cree.com/> (дата обращения 15.03.2013)
18. Автоматизированный измеритель теплового импеданса полупроводниковых диодов с широтно-импульсной модуляцией греющей мощности / В.А. Сергеев, В.И. Смирнов, А.А. Гавриков // Промышленные АСУ и контроллеры. 2010. №3. С. 47- 49.

19. *Сергеев В.А.* Аналитическая модель неизотермического распределения плотности мощности в структурах биполярных транзисторов // Известия вузов. Электроника. 2005. № 3. С. 22-28.

RESEARCH AND ESTIMATION OF ADEQUACY OF THE NONLINEAR THERMAL MODELS OF THE POWERFUL BIPOLAR SEMI-CONDUCTOR DEVICES

© 2013 V.A. Sergeev, A.M. Hodakov

Institute of Radio Engineering and Electronics named after V.A. Kotel'nikov (Ulyanovsk Branch),
Russian Academy of Sciences

In this article we described the mathematical thermal model of the powerful bipolar semi-conductor device taking into account various mechanisms a thermoelectric feedback, operating in device structure. On its basis thermal models of the powerful bipolar transistor and light-emitting diode are developed. The numerically-analytical iterative method solves system of the modelling equations and distributions of density of a current and temperature of active area of semi-conductor structures are calculated. Good conformity of calculation and experimental dependences of thermal resistance transition-case from value of dissipated power for concrete types of the powerful transistor and a light-emitting diode is received. Keywords: mathematical thermal model, a thermoelectric feedback, thermal resistance, a light-emitting diode, a bipolar transistor.

Vyacheslav Sergeev, Doctor of Technics, Director.

E-mail: ufire@mv.ru, sva@ulstu.ru.

Alexander Hodakov, Candidate of Physics and Mathematics,

Senior Research Fellow. E-mail: ln23al@yandex.ru