

Тепловая модель биполярной транзисторной структуры с неоднородностью в области контакта кристалла с теплоотводом

Сергеев В. А., Ходаков А. М.

Рассмотрена тепловая модель осесимметричной биполярной транзисторной структуры с неоднородностью теплофизического типа в области контакта кристалл-теплоотвод и температурозависимой плотностью тока. Найдены неоднородные распределения плотности теплового потока и температуры по активной области структуры в зависимости от модельных параметров, характеризующих размер дефекта K_s и его теплофизические свойства K_d . Показано, что показатель неоднородности температуры нелинейно зависит от параметра K_s . Для различных значений величин модельных параметров полупроводниковой структуры произведена оценка отношения максимальных температур активной области кристалла с дефектом и без него. Определены величины термомеханических напряжений, возникающих в области дефекта. Рассчитаны распределения температуры по поверхности транзисторной структуры при изменении напряжения коллектор-база и тока коллектора.

Введение

В процессе работы мощного биполярного транзистора существует ряд причин, приводящих к неоднородному распределению тока и температуры в полупроводниковой структуре. Одной из таких причин является наличие неоднородностей (дефектов типа пустот и непропаев) в областях тепловых контактов между слоями конструкции полупроводниковых приборов [1]. Чаще всего подобные дефекты находятся в области паяного соединения полупроводникового кристалла с теплоотводом и представляют собой области с низким коэффициентом теплопроводности, что приводит к искажению формы линий теплового потока в структуре вблизи дефекта [2]. Чтобы оценить предельные режимы работы транзистора, необходимо определить степень влияния неоднородностей конечных размеров в контактной области на температуру рабочей поверхности полупроводниковой структуры. Другой задачей является определение термомеханических напряжений, вызванных разностью коэффициентов теплового расширения материалов полупроводниковой структуры и неоднородностью распределения температуры по структуре. Целью работы является проведение расчётного анализа распределений температуры и оценки термомеханических напряжений в полупроводниковых структурах биполярных транзисторов при наличии неоднородности в зоне контакта кристалла с теплоотводом. Рассматривалась осесимметричная полупроводниковая структура. Тепловые модели транзисторных структур других геометрий будут выглядеть подобным образом.

В известных описывающих тепловые контакты математических моделях расчёт температурных полей в структурах с неоднородностями осуществляется без учёта конечности размеров самой структуры и дефекта в предположении линейности задачи распространения тепла по структуре [3,4]. Для учёта положительной обратной связи между протекающими в полупроводниковой структуре тепловыми и электрическими процессами в представляемую тепловую модель вводилась нелинейная функция плотности теплового потока, зависящая от температуры активной области транзистора.

Теплоэлектрическая модель

Рассмотрим тепловую модель, определяющую температурные поля в осесимметричной биполярной транзисторной структуре с неоднородностью теплофизического типа в области контакта кристалла и теплоотвода. На рис. 1 изображена геометрия осесимметричной структуры биполярного транзистора. Можно считать, что всё выделяемое активной областью тепло сосредоточено в той части коллекторного перехода, которая расположена непосредственно под эмиттером. Так как глубина залегания р-п перехода много меньше толщины полупроводниковой подложки, то будем предполагать, что источник тепла расположен на поверхности кристалла в его активной области Π_{ar} .

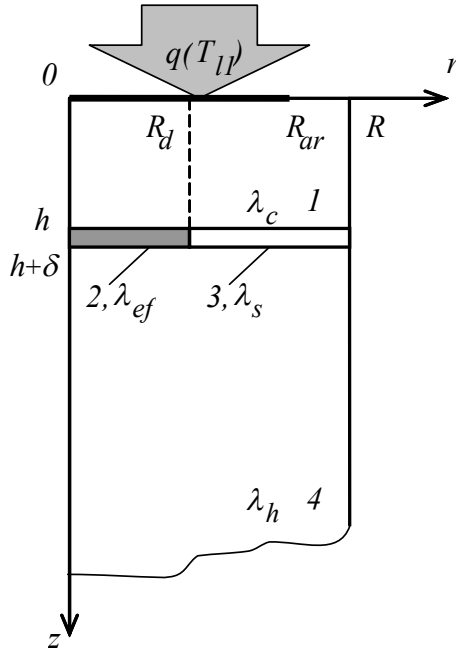


Рис. 1

Геометрия моделируемой трёхслойной конструкции структуры биполярного транзистора: 1 - кристалл, 2, 3 - контактные области (2 - дефект), 4 - полубесконечный теплоотвод

Стационарное уравнение теплопроводности и граничные условия имеют вид:

$$T_{i_{rr}} + (1/r) \cdot T_{i_r} + T_{i_{zz}} = 0, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (1)$$

$$(r, \varphi, z) \in \Omega = \{(r, \varphi, z) : 0 \leq r \leq R, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, 0 \leq z < \infty\},$$

$$T_{i_r}(R, z) = 0, \quad T_{i_r}(0, z) = 0, \quad T_4(r, \infty) = 0, \quad (2)$$

$$-\lambda_c T_{1_z}(r, 0) = q(T_{11}) = \begin{cases} q_{ar}(T_{11}), & r \in \Pi_{ar}; \\ 0, & r \in (\Pi_0 - \Pi_{ar}); \end{cases} \quad (3)$$

$$(r, \varphi) \in \Pi_0 = \{(r, \varphi) : 0 \leq r \leq R, 0 \leq \varphi \leq 2\pi\},$$

$$(r, \varphi) \in \Pi_{ar} = \{(r, \varphi) : 0 \leq r \leq R_{ar}, 0 \leq \varphi \leq 2\pi\},$$

$$\lambda_c T_{1_z}(r, h) - \lambda_{ef} T_{2_z}(r, h) = 0, \quad \lambda_h T_{4_z}(r, h + \delta) - \lambda_{ef} T_{2_z}(r, h + \delta) = 0, \quad (0 \leq r \leq R_d),$$

$$\lambda_c T_{1_z}(r, h) - \lambda_s T_{3_z}(r, h) = 0, \quad \lambda_h T_{4_z}(r, h + \delta) - \lambda_s T_{3_z}(r, h + \delta) = 0, \quad (R_d < r \leq R),$$

$$T_1(r, h) = T_2(r, h), \quad T_4(r, h + \delta) = T_2(r, h + \delta), \quad (0 \leq r \leq R_d),$$

$$T_1(r, h) = T_3(r, h), \quad T_4(r, h + \delta) = T_3(r, h + \delta), \quad (R_d < r \leq R), \quad (4)$$

$$\lambda_{ef} T_{2_r}(R_d, z) - \lambda_s T_{3_r}(R_d, z) = 0, \quad T_2(R_d, z) = T_3(R_d, z), \quad (h \leq z \leq h + \delta), \quad (5)$$

где $T_i = (T_i - T_0)$, T_i - величина перегрева и температура i -го слоя структуры соответственно; T_0 - начальная температура; $q_{ar}(T_{II}) = J_{ar} U_{cb}$ - плотность потока тепла в активной области; U_{cb} - напряжение коллектор-база; R, h, d - характерные размеры структуры по осям r и z ; R_{ar}, R_d - размеры активной области и дефекта по оси r ; $\lambda_c, \lambda_h, \lambda_s, \lambda_{ef}$ - коэффициенты теплопроводности кристалла, теплоотода, материала припоя и дефекта соответственно.

Зависимость плотности тока в активной области полупроводниковой структуры от температуры определяется ВАХ транзистора в следующем виде:

$$J_{ar}(T_{II}) = J_{ar0} \exp \left\{ - \frac{(E_g - eU_{eb} + e\rho J_{ar}(T_{II}))}{k_B T_{II}(r)} \right\}, \quad (6)$$

где U_{eb} - напряжение эмиттер-база, $\rho_{ar} = r \cdot S_{ar}$, r - входное омическое сопротивление транзистора в схеме с общей базой (ОБ), E_g - ширина запрещённой зоны полупроводника, J_{ar0} - слабозависящий от температуры параметр, k_B - постоянная Больцмана, e - заряд электрона.

При задании и поддержании постоянным полным коллекторного тока транзистора ($I_C = const$) полная мощность, рассеиваемая полупроводниковой структурой, должна оставаться постоянной при любом распределении температуры по верхней площади структуры

$$W_0 = \iint_{S_{ar}} U_{cb} J_{ar}(r) r dr d\varphi = const, \quad (7)$$

где S_{ar} - площадь области Π_{ar} .

Численное решение задачи и анализ полученных результатов

Аналитическое решение математической задачи (1)-(7) было найдено в работе [5] при постоянной плотности теплового потока $q(T_{II}) = q_{av} = const$ и в приближении малости радиальной составляющей теплового потока по сравнению с его аксиальной составляющей. В рассматриваемой тепловой модели решение нелинейной задачи переноса тепла в полупроводниковой структуре было получено численным методом. Комплексная программа, предназначенная для расчёта температурного поля по полупроводниковой структуре, включала в себя обращение к программам интерактивной моделирующей среды COMSOL Multiphysics. Распределение плотности теплового потока по активной области $q(T_{II})$ находилось итерационным методом с использованием соответствующей подпрограммы, которая численно решала нелинейное уравнение (6) относительно плотности тока $J_{ar}(T_{II})$ при выполнении условия постоянства мощности (7). По найденному распределению функции плотности теплового потока находились распределения температуры и термомеханических напряжений в структуре с помощью программы моделирующей среды COMSOL.

Введём безразмерные переменные:

$$\Theta_i = \frac{T_i}{T_0}, \quad r^* = \frac{r}{R}, \quad R_d^* = \frac{R_d}{R}, \quad R_{ar}^* = \frac{R_{ar}}{R}, \quad z^* = \frac{z}{R}, \quad h^* = \frac{h}{R}, \quad \delta^* = \frac{\delta}{R}.$$

Для описания неоднородности введём следующие модельные параметры:

$$K_s = S_d / S_0 < 1, \quad K_d = \lambda_{ef} / \lambda_s \leq 1,$$

где S_d, S_0 - площади областей Π_d и Π_0 соответственно. В качестве расчётного примера была выбрана структура мощного транзистора с размерами подобными структуре КТ903А. Принятые в численных расчётах размеры полупроводниковой структуры

составляли: $R = 2,4$ мм, входное сопротивление транзистора в схеме с ОБ $r = 0,26$ Ом, $h^* = 0,083$, $\delta^* = 4.2e-3$, $R_{ar}^* = 0,5$. Физические свойства применяемых в тепловой модели материалов представлены в таблице, [6]. Величины модельных параметров изменялись в следующих пределах: $K_s = (0 - 0,45)$, $K_d = (0,001 - 0,7)$. Начальная температура $T_0 = 290$ К, а $W_0 = 30$ Вт, что соответствует максимально допустимой рассеиваемой мощности для данного типа транзистора.

Таблица

Тепловые и механические свойства материалов

	λ , (Вт/м·К)	c , (Дж/кг·К)	$\rho \cdot 10^{-3}$, (кг/м ³)	E , (ГПа)	ν	$\alpha \cdot 10^{-6}$ (1/К)
кристалл (Si)	120	700	2,33	170	0,28	2,6
припой (Pb + Sn)	50	150	9,0	1	0,4	21
теплоотвод (Cu)	400	384	8,96	120	0,34	16,5

На рис. 2 представлены распределения температур перегрева поверхности кристалла и прилегающей со стороны кристалла зоны контакта (в точках $z^* = 8.3e-2$) при наличии дефекта и без него. Параметр $K_s = 0,028$, что соответствует линейному размеру дефекта $R_d^* = 0,167$. В качестве материала дефектной зоны с самым низким коэффициентом теплопроводности выбиралась воздушная прослойка - $\lambda_{ef} = 0,05$ Вт/м·К. При этом наименьшее значение теплофизического параметра $K_d = 0,001$. В пределах изменений значений модельных параметров максимальный перегрев поверхности кристалла при наличии дефекта увеличивается на 40% по отношению к бездефектной структуре. На рис. 3 изображены распределения радиальной и аксиальной составляющих теплового потока в зоне дефекта контактной области. Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что наиболее напряжёнными областями оказываются геометрические центры верхней поверхности полупроводниковой структуры и прилегающей к контактной области зоны со стороны кристалла.

Представляют интерес оценки влияния размера и теплопроводности дефекта на величину максимальной температуры перегрева активной области кристалла (рис. 4). Наибольшее значение крутизны этой температуры наблюдается при малых размерах неоднородностей - $K_s \leq 0,02$. При дальнейшем увеличении размеров неоднородности увеличение максимальной температуры перегрева происходит по квазилинейному закону. Если параметр дефектности K_d становится больше 0,1, то величина размера дефекта слабо влияет на температурное распределение по активной области. При значениях модельных параметров $K_d = 0,001$ и $K_s > 0,174$ (т. е. при $R_d^* > 0,42$) максимальная температура перегрева активной области кристалла будет возрастать в три и более раз по отношению к бездефектной структуре.

Определим показатель неоднородности распределения температуры по верхней поверхности полупроводниковой структуры следующим образом:

$$\delta_\Theta = \frac{\Theta_m - \Theta_{av}}{\Theta_{av}},$$

где Θ_{av} - величина среднего перегрева активной области полупроводниковой структуры. Расчётные исследования показали (рис. 5), что δ_{Θ} нелинейно зависит от параметра K_s . При некотором значении параметра дефекта K_{s0} наблюдается максимум показателя неоднородности распределения температуры. С увеличением теплофизического параметра K_d происходит сдвиг максимума в сторону меньших значений K_s , то есть малые размеры дефекта слабо влияют на распределение температуры активной области по сравнению с аналогичным распределением для бездефектной структуры. При $K_s > K_{s0}$ вызванное увеличением размера дефекта возрастание величины максимального перегрева активной области структуры будет отставать от роста величины её среднего перегрева. При этом вид функции распределения температуры по активной области кристалла становится подобным аналогичной функции распределения по бездефектной структуре. На рис. 6 показано распределение термомеханических напряжений в зоне дефекта, прилегающей к полупроводниковому кристаллу. Значение величины предела текучести припоя составляло $\sigma_m = 40$ МПа.

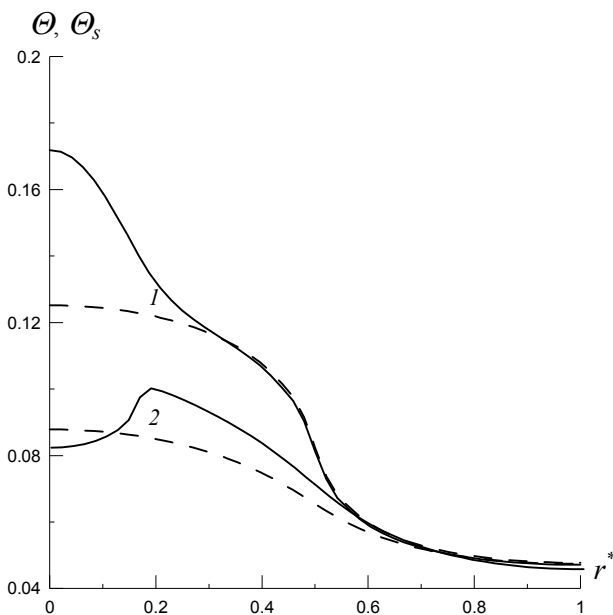


Рис. 2

Температуры перегрева поверхности кристалла - 1 и области контакта - 2; пунктир - без дефекта; $K_s = 0,028, K_d = 0,001$

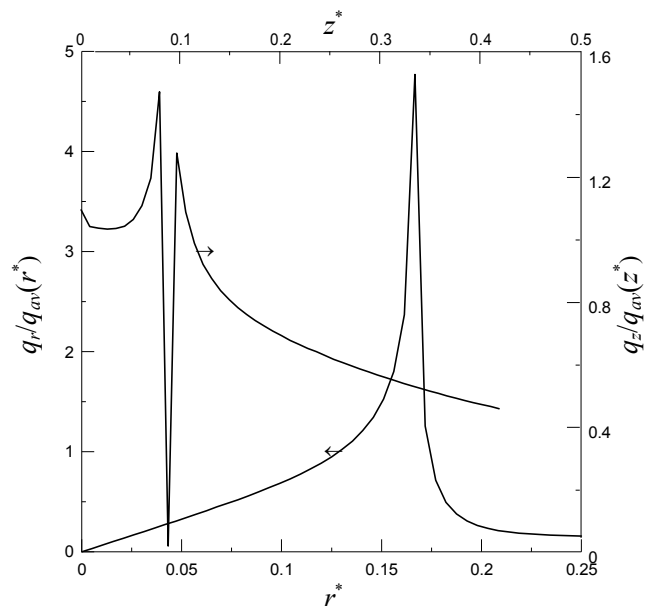


Рис. 3

Радиальная (зона контакта $z^* = 8.3e-2$) и аксиальная (край дефекта $R_d^* = 0,167$) составляющие плотности теплового потока; $K_s = 0,028, K_d = 0,001$

Для заданных величин геометрических и теплофизических характеристик припоя и дефекта значение возникающего на краю дефекта ($r^* = R_d^*$) термомеханического напряжения превышает на 13% предел текучести материала припоя.

На рис. 7 представлены расчётные распределения температуры по верхней поверхности кристалла при постоянной рассеиваемой транзистором мощности $W_o = 30$ Вт и различных электрических режимах работы транзистора. Из полученных результатов видно, что при увеличении напряжения U_c от 25 В до 60 В (максимальное допустимое напряжение коллектор-база для рассматриваемого типа транзистора) и соответствующем уменьшении коллекторного тока от 1,2 А до 0,5 А максимальная температура перегрева активной области кристалла возрастает с 0,17 до 0,24, то есть на 38% (рис. 8). С уменьшением величины входного омического сопротивления транзистора r максимальная температура по верхней поверхности структуры будет возрастать.

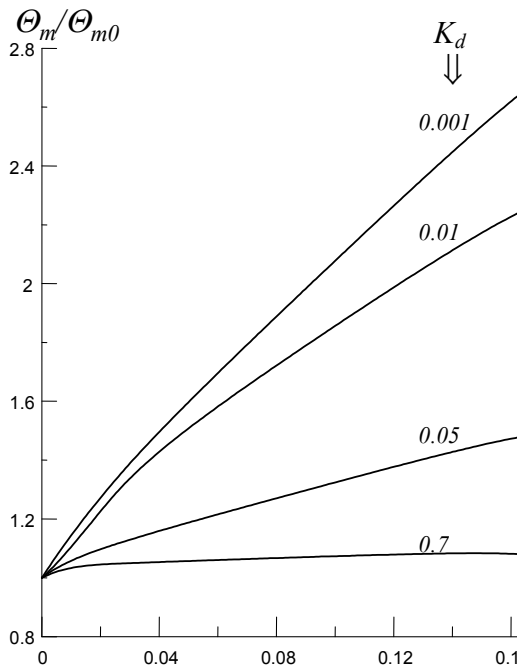


Рис. 4

Отношение максимальных температур перегрева активной области кристалла с дефектом и без него

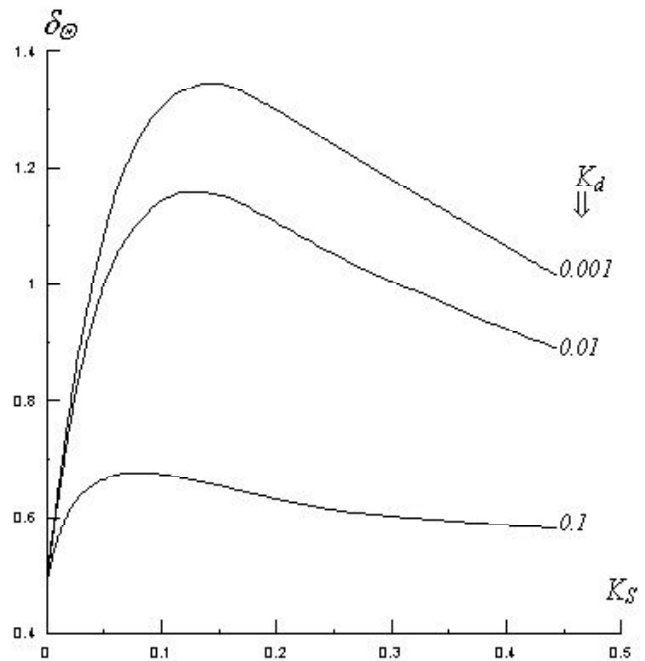


Рис. 5

Показатель неоднородности температуры верхней поверхности кристалла

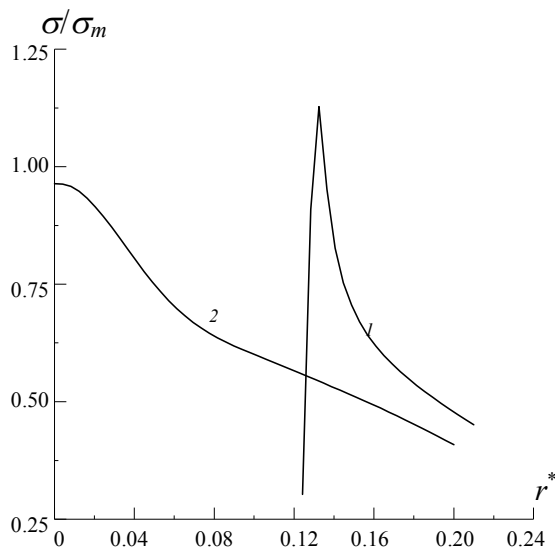


Рис. 6

Термомеханические напряжения в зоне неоднородности контактной области:
1 - с дефектом ($R_d^* = 0,125$); 2 - без дефекта ($K_s = 0,0156$; $K_d = 0,001$)

Заключение

Тепловая модель осесимметричной биполярной транзисторной структуры с дефектом в области контакта кристалл-теплоотвод и температурозависимой плотностью тока с интерактивным применением COMSOL Multiphysics позволила определить неоднородности распределений плотности теплового потока и температуры по активной области полупроводниковой структуры в зависимости от модельных параметров K_s и K_d , характеризующих размер дефекта и его теплопроводность соответственно. Расчёты показали, что показатель неоднородности температуры нелинейно зависит от параметра

K_s с явно выраженным максимумом при некотором значении размера дефекта. В пределах изменений значений модельных параметров максимальный перегрев поверхности кристалла при наличии дефекта увеличивается на 40% по отношению к бездефектной структуре. Наиболее напряжёнными областями полупроводниковой структуры оказываются геометрические центры верхней поверхности полупроводниковой структуры и прилегающей к контактной области зоны со стороны кристалла. Проведённые оценки термомеханических напряжений в области дефекта полупроводниковой структуры показали, что пластические деформации будут возникать на краю дефекта в том месте, где радиальная составляющая теплового потока принимает максимальное значение. Для предельной мощности рассеяния рассматриваемого типа транзистора возрастание напряжения коллектор-база в 2,5 раза приводит к увеличению максимальной температуры активной области полупроводниковой структуры на 38%.

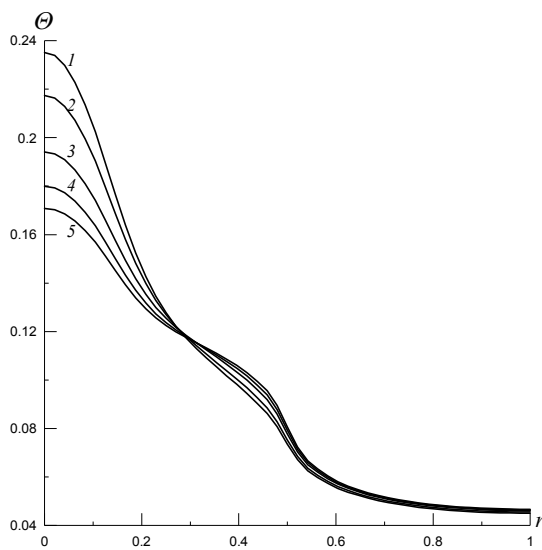


Рис. 7

Температура перегрева поверхности транзисторной структуры с дефектом ($K_s = 0,028$, $K_d = 0,001$, U_{cb} : 1- 60, 2-55, 3-45, 4-35, 5-25В)

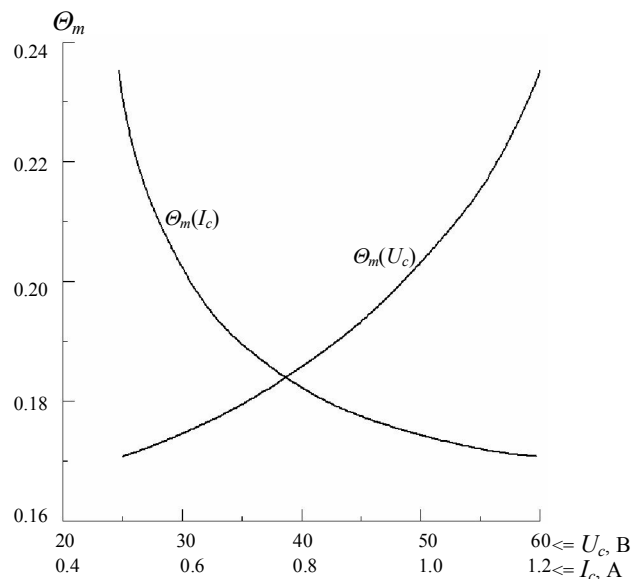


Рис. 8

Зависимости максимальной температуры поверхности транзисторной структуры с дефектом от напряжения коллектор-база и тока коллектора ($K_s = 0,028$, $K_d = 0,001$)

Разработанная тепловая модель может быть применена при конструкторских разработках транзисторных структур и оценке предельных возможностей контактных соединений в полупроводниковых приборах.

Литература

1. Синкевич В. Ф., Савина А. С., Коровкина А. П. Исследование причин и механизмов отказов мощных СВЧ кремниевых транзисторов. - Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 1974, вып. 1, с. 18-27.
2. Шлыков Ю. П., Ганин Е. А., Царевский С. Н. Контактное термическое сопротивление. - М: Энергия, 1977, 328с.
3. Туринов В. И. К задаче обнаружения тепловых неоднородностей в двухслойной пластине из непрозрачных твёрдых материалов// Журнал технической физики, 1997, Т. 67, вып. 10, с. 129-131.
4. Жекамухова И. М. Решение общей линейной задачи теплопроводности для двухслойной среды с учётом неидеального теплового контакта между слоями// Исследовано в России: сетевой журнал, 2003, URL: <http://www.zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003>, (дата обращения 15.06.09).
5. Сергеев В. А., Ходаков А. М. Тепловая модель полупроводниковой структуры с неоднородностью в области контакта с теплоотводом. - Проектирование и технология электронных средств, 2006, №1, с. 49-54.
6. Физические величины. Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. - М.: Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.