



На правах рукописи

Белозерцев Андрей Витальевич

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ СИЛОВЫХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Специальность 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2007

Работа выполнена на кафедре теоретической механики Томского государственного университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Кузнецов Гений Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ
Иванов Владлен Васильевич.

кандидат физико-математических наук,
доцент Жарова Ирина Константиновна

Ведущая организация: Томский университет систем управления и
радиоэлектроники, г. Томск.

Защита состоится «22» мая 2007 г. в 14³⁰ в ауд. 228 10 уч. корпуса на заседании диссертационного совета ДС 212.025.01 при Томском политехническом университете (634050, г. Томск., пр. Ленина д.30).

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан « » апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС 212.025.01
доктор технических наук, профессор



А. А. Орлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Несмотря на то, что биполярные транзисторы широко применяются в современной радиоэлектронике, до настоящего времени не решен ряд серьезных научно-технических проблем, обусловленных спецификой их работы. Так достаточно давно установлено, что при значительной рассеиваемой мощности однородное распределение тока в транзисторе оказывается неустойчивым. Механизм нарушения однородного токораспределения и возникновения "горячих пятен" (областей локальных перегревов) в транзисторных структурах связан с сильной температурной зависимостью плотности тока через эмиттерный переход. Негативные особенности шнурования тока в транзисторе во многом также связаны с тем, что транзистор является прибором, управляемым по этому параметру. Ток эмиттера при постоянном коэффициенте передачи однозначно определяет полный коллекторный ток. Как следствие шнурование при постоянном токе эмиттера может не сопровождаться изменением тока в нагрузке. Этот эффект хорошо известен из эксперимента. Таким образом, при шнуровании тока транзистор может оставаться работоспособным, однако его надежность резко падает, а характеристики сильно деградируют. Существенно, что дальнейшее увеличение тока сопровождается резким увеличением температуры в области шнура, что приводит к тепловому пробое и выходу транзистора из строя.

До настоящего времени анализ распределения плотностей тока и температур параллельных транзисторных структур проводился с применением балансных или плоских стационарных или плоских нестационарных математических моделей. Исключение из рассмотрения третьей координаты приводило к значительному увеличению погрешности определения температур поскольку, как показывают численные эксперименты, имеет место значительный вертикальный градиент температур. Применение же пространственной стационарной модели не позволяет описывать временные характеристики развития тепловой неустойчивости. В то же время использование импульсных режимов работы мощных транзисторов позволяет существенно расширить область допустимых режимов эксплуатации и тем самым повысить эффективность применения транзисторов без ухудшения их надежности. При этом энергетические параметры транзисторов: отдаваемая мощность, коэффициент усиления по мощности в импульсных режимах существенно улучшаются. В первую очередь эти преимущества связаны с уменьшением теплового сопротивления при достаточно коротких импульсах.

Анализ состояния теории и практики применения транзисторов показывает, что в настоящее время существует потребность в математических моделях, учитывающих комплекс взаимосвязанных теплофизических и электрических процессов, протекающих в транзисторных структурах. Также при

прогнозировании надежности транзисторов необходимо учитывать нестационарность и пространственность теплофизических и электрических процессов, температурные зависимости теплофизических и электрофизических характеристик применяемых материалов.

Целью диссертационной работы является численное моделирование процессов теплопереноса в корпусе силового биполярного транзистора с учетом температурной зависимости интенсивности тепловыделения, коэффициента теплопроводности, теплоемкости и токов. При теоретическом анализе распределения температурного поля кристалла задачи исследования состояли в определении температур активных областей кристалла при различных электрических режимах работы и сравнении с результатами проведенных автором диссертации экспериментальных исследований.

При анализе механизма токораспределения в кристалле кремния задача состояла в теоретическом исследовании влияния значения сопротивления балластных резисторов, топологии эмиттерных областей, сопротивления металлизации на распределение плотности тока эмиттерных полос, температурное поле и вольтамперные характеристики биполярного транзистора.

Научная новизна работы.

Впервые решена пространственная нелинейная нестационарная задача теплопроводности в корпусе биполярного транзистора с учетом температурной зависимости токов. Выделены режимы тепловой неустойчивости с учетом нестационарного пространственного распределения температур кристалла.

Впервые получены распределения плотности тока эмиттерных полос и динамические вольтамперные характеристики транзистора с учетом пространственного распределения температурного поля и влияния сопротивления металлизации.

Практическая значимость работы.

Полученные результаты по распределениям температур и плотностей токов эмиттерных областей могут быть использованы для совершенствования существующих математических моделей биполярных транзисторов, применяемых при разработке электрических схем, а также на этапе проектирования мощных полупроводниковых устройств этого класса с целью оптимизации ряда их параметров.

Защищаемые положения.

На защиту выносятся:

1. Пространственная нестационарная модель типичного биполярного транзистора с учетом температурной зависимости токов и неоднородности теплофизических характеристик области решения.
2. Результаты численного моделирования пространственных температурных полей биполярного транзистора.
3. Результаты численного моделирования распределения плотности тока и вольтамперных характеристик транзисторной структуры.
4. Результаты экспериментального исследования температур на поверхности кристалла типичного биполярного транзистора КТ819Г.

Достоверность полученных результатов.

Обоснованна хорошим соответствием теоретических значений температур, полученных автором при реализации его модели, и экспериментальных данных по характерным температурам силовых транзисторов.

Личный вклад автора.

Состоит в постановке задачи, разработке метода и алгоритма её решения, проведении численного анализа исследованных процессов, обработке и обобщении результатов теоретических исследований, постановке и планировании экспериментальных исследований, проведении эксперимента, анализе и обобщении полученных результатов, формулировке выводов и заключения по диссертации.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XXVII Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2004); Международной конференции “Сопряженные задачи механики, информатики и экологии”. (Томск, 2004); 2-й Международной научно-технической конференции “Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании” (Тюмень, 2006), 5-й Всероссийской конференции “Фундаментальные и прикладные проблемы механики (Томск, 2006)”.

Публикации.

По теме диссертации автором опубликовано пять статей, три в журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных исследований. Также опубликованы материалы трёх Всероссийских и международных конференций.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения и списка цитируемой литературы. Материал изложен на 120 листах, включает 49 рисунков. Список цитируемой литературы состоит из 62 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и основные задачи диссертации.

В **первой главе** проведен аналитический обзор современного состояния математического моделирования температурных полей в компонентах радиоэлектронной аппаратуры. В этой главе обосновывается необходимость создания нестационарных пространственных математических моделей теплопереноса с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик кристалла и интенсивности тепловыделения.

Во **второй главе** сформулирована математическая модель совместно протекающих процессов теплопереноса и токораспределения в силовом биполярном транзисторе. В качестве объекта исследования рассматривался

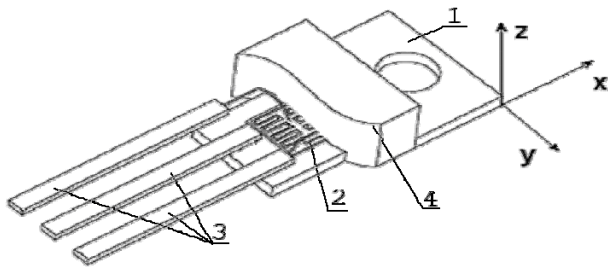


Рис. 1 Транзистор в корпусе ТО-220. 1) медное основание; 2) кристалл кремния; 3) ножки выводов; 4) пластик

кондуктивного теплопереноса между радиатором и корпусом транзистора, конвективного теплообмена с внешней средой, зависимости теплоемкости, теплопроводности и интенсивности тепловыделения от температуры.

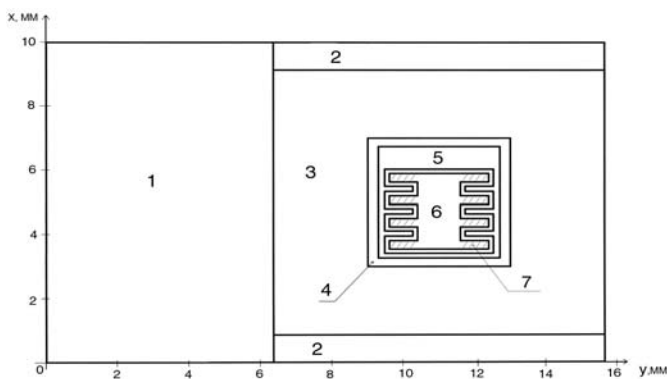


Рис. 2 Схема области решения.(1- медное основание, 2-пластик, 3-пластик на медном основании,4-кристалл на медном основании в пластике, 5-базовое медное напыление на кристалле, 6-эмиттерное медное напыление на кристалле, 7-заштрихованные области - восемь источников тепловыделения.)

типичный биполярный транзистор КТ819Г, выполненный в широко распространенном корпусе ТО-220. Рассматривалась задача о температурном поле в транзисторе с несколькими источниками тепловыделения. Теоретическое исследование проводилось с учетом комплекса основных теплофизических и электрических процессов:

В типичном транзисторе все основные элементы корпуса кроме крепежного отверстия представляют собой параллелепипеды или их группу, поэтому задача рассматривалась в прямоугольной системе координат. Параллелепипед включает в себя несколько элементов (такой же конфигурации) с отличающимися теплофизическими характеристиками и размерами – радиатор, слой теплопроводной пасты, медное основание, пластиковая крышка, электрические выводы, кристалл кремния, медное напыление на кристалле. Внутри

параллелепипеда действуют несколько локальных источников тепловыделения с интенсивностями, зависящими от температур самих источников $Q_i(t, \tilde{T}_i)$.

При постановке задачи использованы следующие допущения.

1. Теплофизические характеристики материалов параллелепипедов считаются изотропными. Это допущение обосновано, т.к. для большинства материалов типична изотропия.
2. На границах между элементами тепловой контакт принимается идеальным. Для конструктивных элементов транзистора это обоснованное приближение, благодаря современной технологии производства полупроводниковых приборов.
3. Эффектом отеснения эмиттерного тока от центра полосы из-за влияния объемного сопротивления базы пренебрегается.

Уравнение теплопроводности в рассматриваемом случае имеет вид:

$$c(x, y, z, T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t, T) \quad (1)$$

где $C(x, y, z, T)$ – объемная теплоемкость, $\lambda(x, y, z, T)$ – теплопроводность, $Q(x, y, z, t, T)$ – интенсивность тепловыделения, x, y, z – пространственные координаты, t – время.

$$0 \leq t \leq t_{\max}, \quad 0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad 0 \leq z \leq L_z;$$

где L_x, L_y, L_z – максимальные линейные размеры корпуса транзистора.

Начальное условие:

$$t = 0, \quad T = T_0(x, y, z); \quad (2)$$

На границах корпуса транзистора задавались граничные условия 3-го рода:

$$x = 0, y \in [0; L_y], z \in [0; L_z]; \quad -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \cdot (T_B - T), \quad (3)$$

$$x = L_x, y \in [0; L_y], z \in [0; L_z]; \quad \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \cdot (T_B - T), \quad (4)$$

$$y = 0, x \in [0; L_x], z \in [0; L_z]; \quad -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \cdot (T_B - T), \quad (5)$$

$$y = L_y, x \in [0; L_x], z \in [0; L_z]; \quad \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \cdot (T_B - T), \quad (6)$$

$$z = 0, x \in [0; L_x], y \in [0; L_y]; \quad -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \cdot (T_B - T), \quad (7)$$

$$z = L_z, x \in [0; L_x], y \in [0; L_y]; \quad \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \cdot (T_B - T), \quad (8)$$

где x, y, z – координаты; α – коэффициент конвективного теплообмена с внешней средой; T_B – температура внешней среды;

Для определения коэффициента конвективного теплообмена внешних поверхностей корпуса транзистора с окружающей средой в диапазоне 0-130 С использовалось аппроксимационное выражение, предложенное Г.Н. Дульневим:

$$\alpha(T) = (1.42 - 1.4 \cdot 10^{-3} T_m) \cdot N2 \cdot \left(\frac{T_{II} - T_B}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

Где T_m - среднее арифметическое температур поверхности транзистора и внешней среды; $N2$ - коэффициент, зависящий от ориентации поверхности в пространстве; T_{II} - температура поверхности; L - определяющий размер поверхности.

Для описания зависимости коэффициента теплопроводности кремния применялось следующее выражение:

$$\lambda(T) = \lambda_0 \cdot \left[\frac{T}{T_0} \right]^r \quad (10)$$

где λ_0 - теплопроводность кремния при температуре T_0 .

Для описания зависимости теплоемкости кремния от температуры использовалось выражение:

$$c(T) = 846.4 + 1.18 \cdot 10^{-1} \cdot T - 1.555 \cdot 10^7 \cdot T^{-2} \quad (11)$$

Плотность коллекторного тока выражалась следующим образом:

$$J_k(U_{\delta-\gamma}, T_{\delta-\gamma}) = J_{k0} \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (U_{\delta-\gamma} - E_g(T_{\delta-\gamma}))}{k \cdot T_{\delta-\gamma}} - \frac{q \cdot (U_0 - E_g(T_0))}{k \cdot T_0}\right) \cdot \left(\frac{T_{\delta-\gamma}}{T_0}\right)^n \quad (12)$$

где q - заряд электрона, J_{k0} - плотность тока при напряжении “база-эмиттер” U_0 и температуре T_0 , k - постоянная Больцмана, $T_{\delta-\gamma}$ - температура эмиттерного

перехода, n - коэффициент равный 3.83, $E_g(T) = E_{g0} - \frac{\alpha \cdot T^2}{\beta + T}$ - температурная

зависимость напряжения запрещенной зоны кремния, $E_{g0} = 1.17 \text{ В}$, $\alpha = 4.73 \cdot 10^{-4}$, $\beta = 636$.

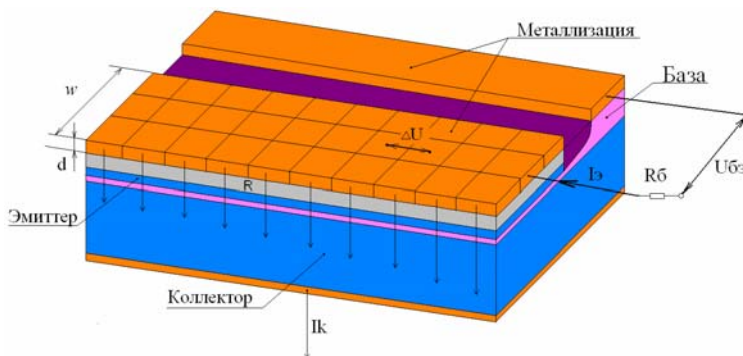


Рис. 3 Схема эмиттерной полосы.

R_b - сопротивление металлизации от контакта до начала полосы, R - слой диффузионного сопротивления, $I_э$ - ток эмиттерной полосы, ΔU - падение напряжения на сопротивлении напыления.

распределении температур приводит к уменьшению плотности тока эмиттерной

На рис. 3 изображена схема протекания тока эмиттера по эмиттерной полосе. Эмиттерный ток $I_э$ втекает в полосу (справа на рисунке) через контактную металлизацию. При протекании тока по металлизации эмиттерной полосы на каждом участке часть эмиттерного тока ответвляется в коллектор. Таким образом, ток в металлизации убывает к концу полосы. Так же из-за конечного сопротивления эмиттерной полосы происходит уменьшение напряжения вдоль полосы, что при равномерном

полосы вдоль полосы. При этом имеет место дополнительное падение напряжения на диффузионном слое, который вводится в структуру для температурной стабилизации.

Система уравнений для токов нескольких эмиттерных полос имеет вид:

$$I_n = w \cdot \int_0^L J(U_{\bar{\sigma}_3}(x, n), T(x, y, z)) \cdot dx \quad (13)$$

$$U_{\bar{\sigma}_3}(A, n) = U_{\bar{\sigma}} - I_n \cdot R_n - \frac{\rho}{w \cdot d} \times \\ \times \int_0^A \left[I_n - w \cdot \int_0^{x'} J(U_{\bar{\sigma}_3}(x, n), T(x, y, z)) dx \right] \cdot dx' - \\ - J(U_{\bar{\sigma}_3}(x, n), T(x, y, z)) \cdot \rho_{\bar{\sigma}} \cdot d_{\bar{\sigma}} \\ - J(U_{\bar{\sigma}_3}(x, n), T(x, y, z)) \cdot \rho_{\bar{\sigma}} \cdot d_{\bar{\sigma}} \quad (14)$$

$$I = \sum_{n=1}^N I_n \quad (15)$$

Где I_n - ток n -й полосы; w -ширина полосы; L - длина полосы; $U_{\bar{\sigma}_3}(A, n)$ - напряжение “база-эмиттер” для n -ой полосы в точке с координатой (A, y, z) ; R_n - сопротивление металлизации от контакта до n -ой полосы, $U_{\bar{\sigma}}$ - напряжение “база-эмиттер” для всего прибора; d - толщина напыления полос; ρ -удельное сопротивление напыления, $d_{\bar{\sigma}}$ - высота диффузионного сопротивления эмиттера; $\rho_{\bar{\sigma}}$ -удельное сопротивление диффузионного сопротивления эмиттера, I -заданный ток прибора.

Связь между интенсивностью тепловыделения и током коллектора имеет вид:

$$Q(x, y, z, T) = U_k \cdot \frac{J(U_{\bar{\sigma}_3}(x), T(x, y, z))}{D} \quad (16)$$

где D - толщина активной области кристалла, U_k - напряжение “коллектор-эмиттер”.

Сформулированная система дифференциальных уравнений (1-16) с соответствующими начальными и граничными условиями решено методом конечных разностей. Для решения разностных аналогов трехмерного уравнения теплопроводности использовалась схема расщепления по координатам. Решение полученных одномерных разностных уравнений проводилось в два этапа:

1. Построение итерационного цикла для преодоления нелинейности уравнения, вызванной зависимостью интенсивности тепловыделения, коэффициента теплопроводности и теплоемкости от температуры. В качестве начального приближения задавалось значение сеточной функции на предшествующем временном слое. После подстановки начального приближения получалось линейное уравнение для определения первого приближения. Итерационный цикл заканчивался при условии:

$$\max |T^g - T^{g-1}| \leq \delta \quad (17)$$

где g-номер итерации, δ -заданная точность вычислений.

При достижении заданной точности осуществлялся переход к следующему временному слою. В принятом диапазоне температур целесообразно считать достаточной точность вычислений $\delta=0.001$ К.

2. Для решения линейной системы алгебраических уравнений на каждом шаге итерационного цикла использовался метод прогонки с применением неявной четырехточечной разностной схемы аппроксимации, обладающей абсолютной устойчивостью и хорошо себя зарекомендовавшей при решении задач теплопроводности.

На каждом шаге расчета температур проводился контроль по балансу энергии.

Для проведения тестирования математической модели использовалась электротепловая аналогия законов распространения тепла и законов электростатики. Электрический аналог плоской задачи о температурном поле решен в системе схемотехнического моделирования Microcap 7.0.

Уравнение теплового потока выражалось законом Фурье:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (18)$$

Уравнению Фурье соответствует электрический аналог - закон Ома:

$$J = -\frac{1}{\rho_s} \cdot \text{grad}(\varphi) \quad (19)$$

где ρ_s - электропроводность, φ - электрический потенциал.

Уравнение баланса тепловой энергии в объемном элементе:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = Q \quad (20)$$

Ему соответствует электрический аналог компонентного уравнения емкости:

$$C \cdot \frac{\partial U}{\partial t} = I \quad (21)$$

Граничному условию первого рода в качестве электрического аналога соответствует источник напряжения с нулевым внутренним сопротивлением. Граничному условию второго рода соответствует аналог в виде источника тока с бесконечным дифференциальным внутренним сопротивлением. Граничному условию третьего рода соответствует аналог в виде источника тока с конечным внутренним сопротивлением, определяемым коэффициентом теплоотдачи с поверхности.

Замена тепловых величин электрическими величинами проводилась согласно таблице 1.

Таблица 1. Соответствия физических величин для электротепловой аналогии.

Тепловая величина	Электрическая величина
T – Кельвин	U – Вольт
Q – Вт/м ²	J – Ампер /м ²
Q – Дж	Q – Кулон
$V \cdot c \cdot \rho$ – Дж/К	C – Фарад
$X/(\lambda \cdot S)$ – К/Вт	R – Ом

Из результатов тестирования установлено, что в целом наблюдается достаточно хорошее совпадение расчетных температур с полученными результатами в системе моделирования Microcap 7.0. Максимальные отклонения температур по всей области решения не превышали 2%.

В третьей главе представлены результаты исследований температурного поля и токов кристалла транзистора с изменением основных значимых параметров и характеристик объекта исследования в диапазонах изменения, соответствующих реальным режимам работы полупроводниковых приборов. Проведено варьирование координат расположения кристалла на основании корпуса, топологии эмиттерных полос, значений сопротивлений балластных резисторов, коллекторного тока и напряжения.

Исследовался активный режим работы транзистора. Напряжение “коллектор-эмиттер” и ток коллектора считались заданными. Рассматривались два типичных реальных варианта изменения тока коллектора и напряжения “коллектор-эмиттер”. Первый вариант: напряжение “коллектор - эмиттер” фиксировано, ток коллектора линейно возрастает от минимального значения до максимального, затем с такой же скоростью линейно уменьшается до минимального значения. Второй вариант: ток коллектора фиксирован, а напряжение “коллектор – эмиттер” так же линейно возрастает и затем линейно убывает. Времена нарастания и спада пилообразного напряжения и тока варьировались от 5мс до 20 мс. Моделирование велось на неравномерной и нерегулярной сетке. Максимальное число узлов сетки составляло 124x110x70. Шаг по времени выбирался таким образом, чтобы рост температуры характерных точек за один временной шаг не превышал 0,02К. При этом шаг по времени составлял от 0.5 мкс до 15 мкс.

Типичные для данного класса транзисторов результаты исследований в виде семейства входных и проходных вольтамперных характеристик для различных максимальных токов коллектора I_k и времен роста и спада пилообразного напряжения t_{II} приведены на рис. 4-5. Кривые состоят из двух частей, соответствующих росту коллекторного тока и его спаду. Правая ветвь каждой характеристики соответствует нарастанию тока коллектора, а левая ветвь соответствует уменьшению тока коллектора. В изотермическом приближении,

которое используется до настоящего времени при проектировании электрических схем, левая и правая ветви характеристик сливаются в одну ветвь в виде экспоненты. Это не позволяет оценивать временные характеристики образования тепловых неустойчивостей, что особо важно при разработке схем мощных импульсных устройств.

На рисунке 5 приведены зависимости напряжения "база-эмиттер" от напряжения "коллектор-эмиттер" при различных временах изменения коллекторного напряжения и тока коллектора 1А. В изотермическом приближении напряжение на коллекторе не влияет на напряжение "база-эмиттер". Влияние возможно только на высоких частотах из-за присутствия собственной емкости транзистора "коллектор-база". Но как показывают результаты численного моделирования возможно сильное влияние выходных цепей на входные цепи на низких частотах (порядка сотен герц) посредством тепловой связи.

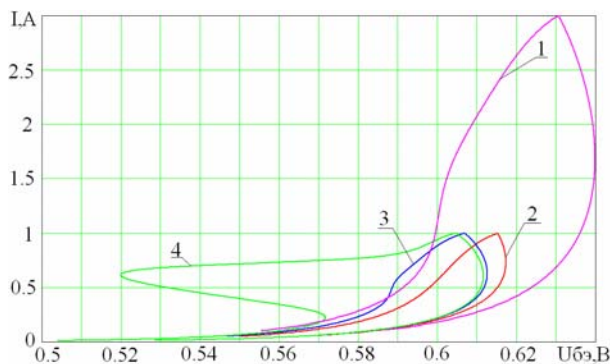


Рис. 4 Зависимость напряжения "база-эмиттер" от тока коллектора (1— $U_k=30$ В, $t_{II}=20$ мс; 2— $U_k=60$ В, $t_{II}=10$ мс; 3— $U_k=60$ В, $t_{II}=20$ мс; 4— $U_k=60$ В, $t_{II}=22$ мс).

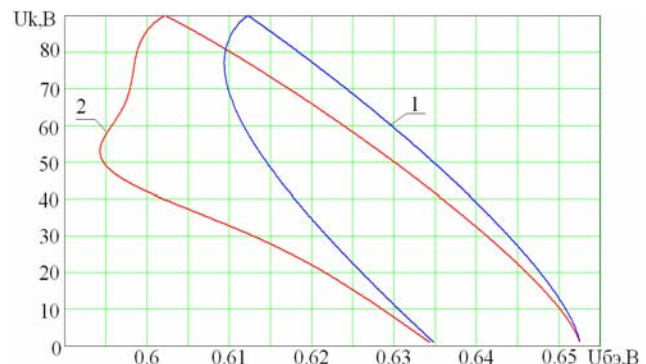


Рис. 5 Зависимость напряжения "база-эмиттер" от напряжения "коллектор-эмиттер". (1 - $t_{II}=5$ мс; 2 - $t_{II}=10$ мс.)

Так же по виду типичных вольтамперных характеристик можно судить о наличии тепловой неустойчивости в структуре, что имеет значение на этапе выходного контроля с целью обнаружения дефектов напайки кристалла. На левой ветви (рис.4) кривых 3,4 видны выпуклости. Они соответствуют началу образования тепловой неустойчивости.

На этапе проектирования биполярного транзистора особый интерес представляет распределение плотности тока эмиттерных полос, как характеристика, определяющая один из основных параметров транзистора — коэффициент усиления по току. Получены зависимости (рис. 6-7) распределения плотности тока вдоль эмиттерной полосы от времени для режима с образованием тепловой неустойчивости при токе коллектора 1А и $t_{II}=5$ мс. Из рисунка видно,

что начальное состояние распределения плотности тока уже неравномерно и уменьшается к концу эмиттерной полосы. Это связано с влиянием сопротивления металлизации, которое вызывает понижение напряжения к концу полосы. Далее с прогревом эмиттерной полосы температура в ее центре растет быстрее, чем на

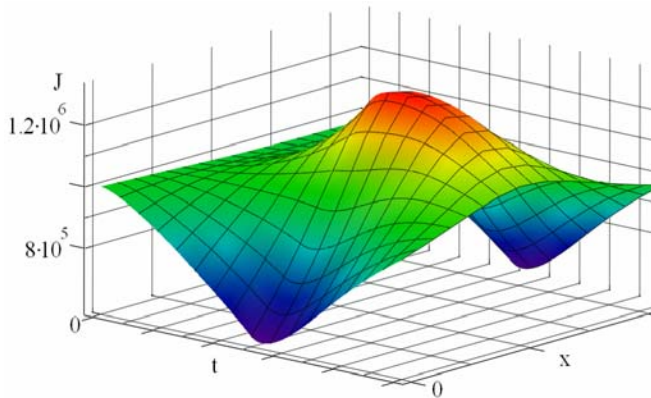


Рис. 6 Распределение плотности тока эмиттерной полосы $I_k=1\text{A}$, $t_{II}=5\text{мс}$.

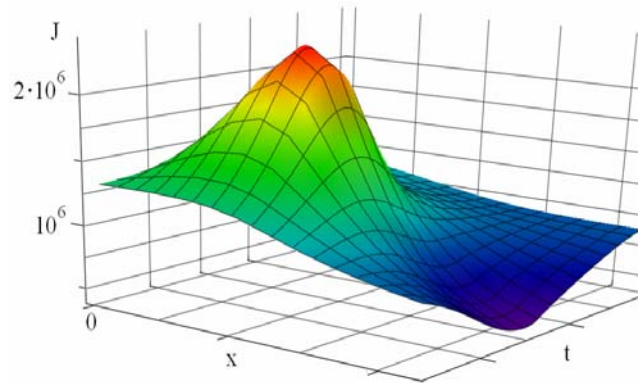


Рис. 7 Распределение плотности тока эмиттерной полосы с увеличенным сопротивлением металлизации.

периферии. Это связано с тем, что тепловое сопротивление в центре выше, чем на периферии. Поэтому распределение плотности тока имеет выпуклость в середине полосы и провалы на концах полосы. С дальнейшим уменьшением общего тока полосы неравномерность распределения плотности тока сохраняется.

В результате проведенных исследований установлено, что доминирующим фактором в формировании неравномерного распределения плотности тока является не сопротивление металлизации, как считалось ранее, а разница тепловых сопротивлений центра полосы и периферии. При увеличении сопротивления металлизации на порядок происходит смещение максимума плотности тока в сторону начала полосы, но в целом вид зависимости $J(x,t)$ не изменяется (рис.7).

С целью выравнивания неоднородности температурного поля кристалла проводилось варьирование значений сопротивлений балластных резисторов. Значения сопротивлений выбирались из следующих соображений. Чем ниже тепловое сопротивление эмиттерной полосы, тем ниже должно быть значение сопротивления балластного резистора. С понижением значения сопротивления ток эмиттерной полосы возрастет относительно соседних эмиттерных полос, что приведет к повышению их температуры и выравниванию температурного поля кристалла.

Установлено, что при некоторых значениях балластных сопротивлений можно частично компенсировать действие положительной тепловой обратной связи. Из рисунка 8 видно, что температурное поле поверхности кристалла в этом случае достаточно равномерно. Перепады средних температур эмиттерных полос не превышают 8 градусов. Временные зависимости токов эмиттерных полос имеют нетривиальный вид (рис.9). Относительная неравномерность токов эмиттерных полос не превышает 36%, а в стационарном режиме 18%. Также наблюдаются некоторые осцилляции токов. Учитывая колебательное поведение токов эмиттерных полос, следует ожидать, что напряжение "база-эмиттер" при гармоническом токе коллектора будет содержать не только кратные гармоники

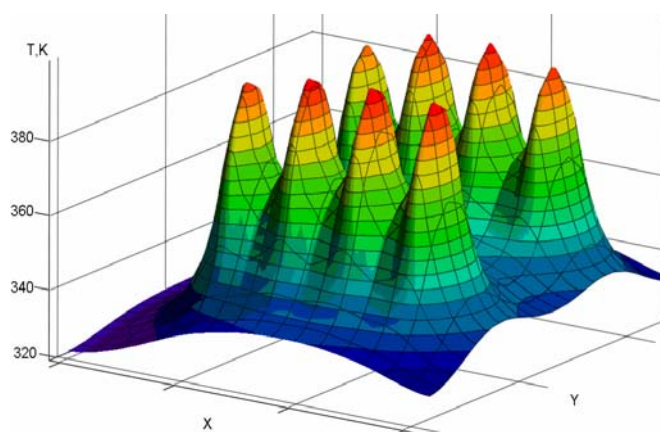


Рис. 8 Температурное поле поверхности кристалла.

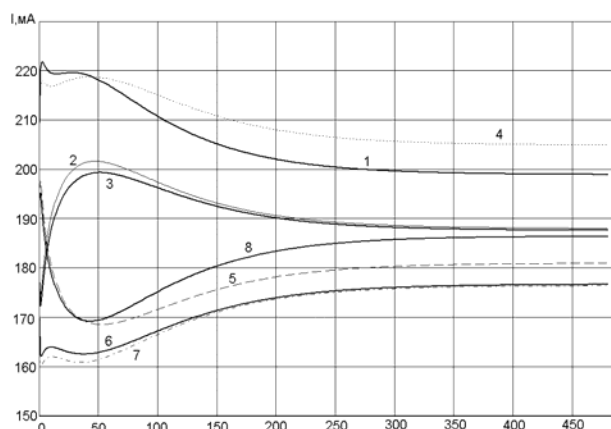


Рис. 9 Временные зависимости токов эмиттерных полос.

тока коллектора, но и комбинационные частоты, образованные основной воздействующей гармоникой и частотами тепловых взаимодействий. Таким образом, тепловые процессы, которые протекают со временами, сравнимыми с периодами звуковых частот, будут являться источником дополнительных нелинейных искажений.

Для выявления масштабов влияния топологии эмиттерных полос на неравномерность температурного поля было проведено его исследование для трех топологий кристалла. Установлено, что выбор топологии эмиттерных полос значительно влияет на неравномерность температурного поля. И соответствующий выбор топологии позволяет повысить предельную рассеиваемую мощность прибора. На (рис.11,13,15) приведены результаты исследований при рассеиваемой мощности 60 Вт, напряжении "коллектор-эмиттер" равным 60 В. Для всех вариантов топологии общая площадь эмиттеров была постоянной. На рис.10 приведена типичная топология кристалла транзистора КТ819Г.

Видно, что распределение температур (рис.11) неравномерно, перепад температур между отдельными эмиттерными полосами составляет около 20 градусов, что приводит к отличию их коллекторных токов в 4 раза. Центральные полосы имеют

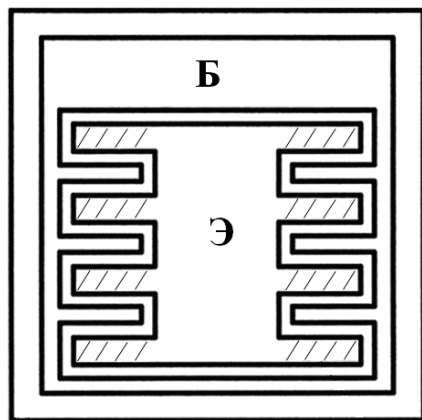


Рис. 10 Вариант топологии №1

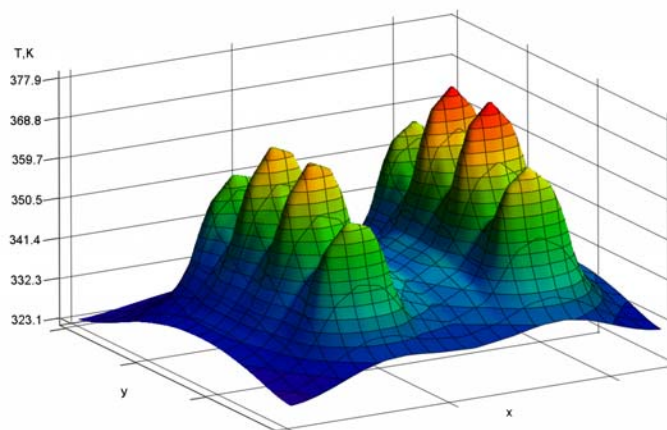


Рис. 11 Распределение температур поверхности кристалла для варианта №1

более высокую температуру, поскольку разогреваются соседними полосами. У каждой центральной полосы есть по одной соседней полосе, а у крайних полос имеется только одна соседняя полоса, поэтому их температуры ниже. Численные исследования показали, что температуры центральных полос можно снизить путем увеличения расстояния между ними (рис.12). Базовый контакт переносится из верхней части в середину кристалла и должен присоединяться в двух местах (что является недостатком). Из рис.13 видно, что неравномерность температурного поля в этом варианте уменьшилась по сравнению с вариантом №1. Перепад температур между отдельными эмиттерными полосами составляет около 10 градусов (рис.13), что приводит к различию их токов в 2 раза и говорит о значительном влиянии топологии эмиттерных областей на распределение температур кристалла.

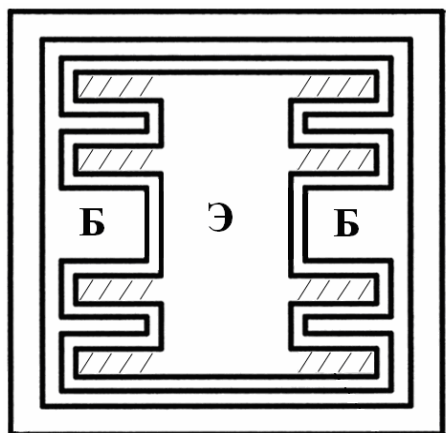


Рис. 12 Вариант топологии №2

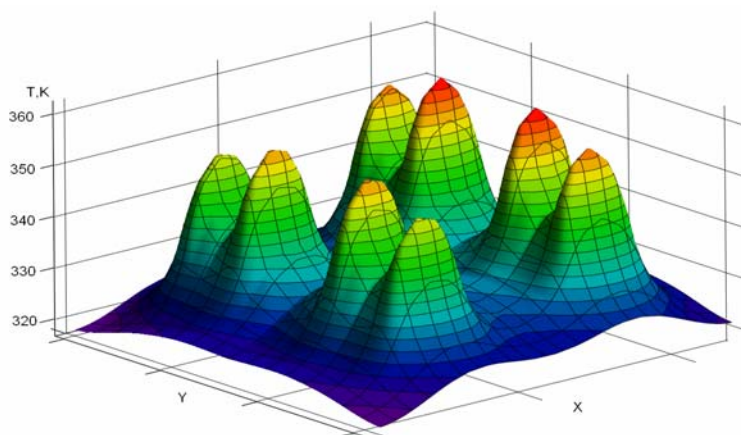


Рис. 13 Распределение температурного поля поверхности кристалла для топологии №2

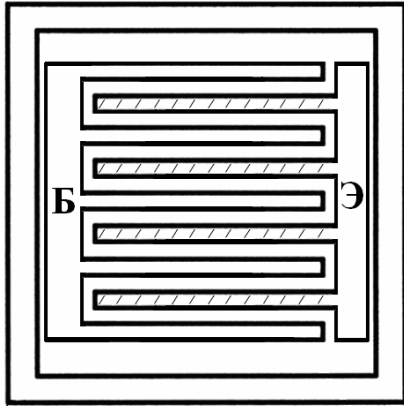


Рис. 14 Вариант топологии №3

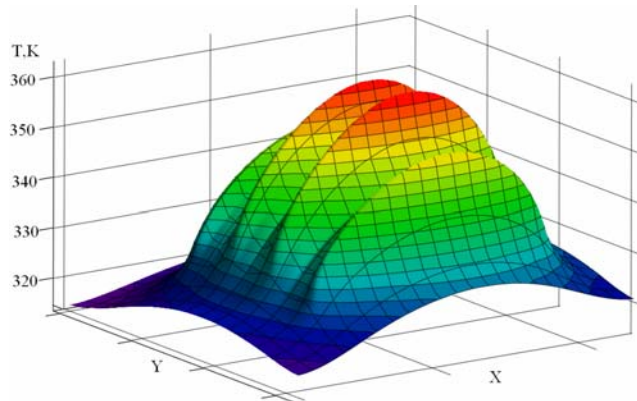


Рис. 15 Распределение температурного поля поверхности кристалла для топологии №3

Как было показано выше, сопротивление металлизации эмиттерных полос слабо влияет на распределение плотности тока, поэтому вызывает интерес распределение температурного поля для относительно длинных эмиттерных полос. В варианте топологии №3 было проведено увеличение длины эмиттерных полос и сокращение их ширины при неизменной общей их площади. Из рис.15 видно, что в среднем отличия между соседними полосами составляет около 10 градусов, но перепад температур вдоль полос превышает 20 градусов, что создает предпосылки для возникновения тепловой неустойчивости в пределах самой полосы при относительно равномерном распределении токов между эмиттерными полосами. Это обусловлено значительными амплитудами низкочастотных составляющих. При этом плотность тока на периферии полосы отличается в 4 раза от плотности тока в центре полосы, что говорит о низкой эффективности использования площади эмиттера. Следовательно, для подавления длинноволновых составляющих имеет смысл сокращать длину полосы, а для сохранения общей площади увеличивать число полос, при этом, располагая их таким образом, чтобы плотность расположения полос в центре кристалла была ниже, чем по периферии кристалла. В этом смысле топология №2 наиболее близка к оптимальной из всех рассмотренных топологий.

Из анализа конструктивных особенностей транзистора, таких как малая толщина кристалла (около 200-300 мкм) и медного основания (1.2 мм) можно сделать ошибочный вывод о целесообразности применения плоской модели теплопереноса для экономии вычислительных ресурсов. Но как показывают численные исследования, из-за высоких интенсивностей тепловыделения имеет место значительный вертикальный градиент температур. Из рис. 16 видно, что перепад температур по толщине кристалла составляет более 20 градусов, по толщине медного основания около 15 градусов при рассеиваемой мощности 60 Вт. Также на рис.17 приведено температурное поле нижней поверхности корпуса транзистора, контактирующей с радиатором. Видно, что распределение температур гораздо равномернее, чем температурное поле поверхности кристалла

(рис.11). Из этого следует, что температурное поле с увеличением координаты Z значительно трансформируется, что говорит о недопустимости пренебрежения этим направлением. На рис.17 видно, что градиент температур в области

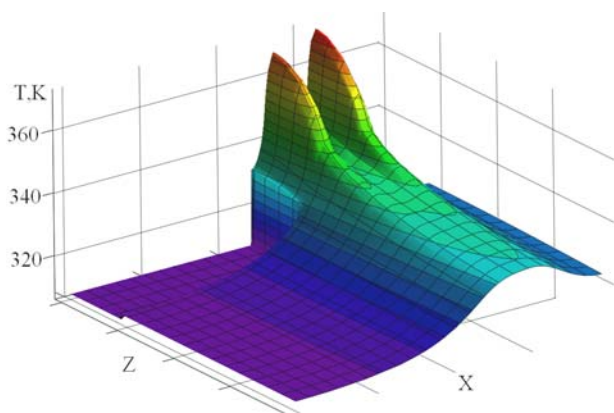


Рис. 16 Температурное поле транзистора в вертикальном разрезе при рассеиваемой мощности 60Вт.

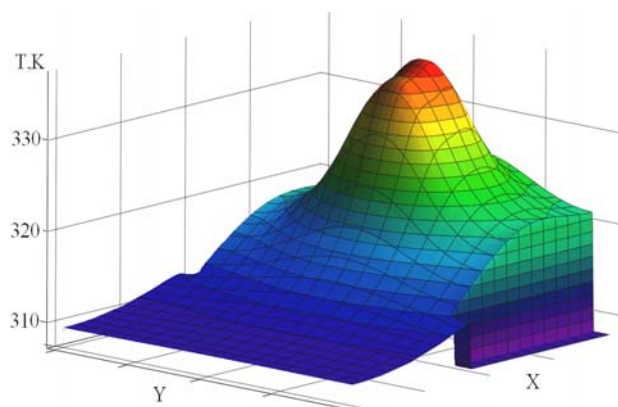


Рис. 17 Температурное поле нижней поверхности корпуса транзистора при рассеиваемой мощности 60Вт.

отсутствующего крепежного отверстия мал, что позволяет при постановке задачи им пренебречь.

В четвертой главе выполнено экспериментальное исследование температур четырех характерных областей поверхности кристалла при различных рассеиваемых мощностях исследуемых приборов. Выявлены электрические режимы работы транзистора с образованием тепловых нестабильностей и масштабы неоднородности температур, при которых кристалл еще сохраняет работоспособность. Перепад температур отдельных областей поверхности кристалла достигал 50 градусов. При этом температуры кристалла не превышали предельно допустимых для данного класса приборов. При проведении экстремальных тестов установлено, что транзисторы выходили из строя при электрических режимах работы не превышающих паспортные. При умеренно высоких напряжениях “коллектор-эмиттер” (около 80% от максимального заявленного производителем), транзисторы выходили из строя при рассеиваемой мощности, не превышающей и 40% от максимальной рассеиваемой мощности. При таком напряжении достаточно 30 Вт рассеиваемой мощности для металлического корпуса (ТО-3) чтобы вывести кристалл в режим тепловой неустойчивости. При снижении напряжения на коллекторе до 30В можно увеличить рассеиваемую мощность свыше 100Вт, при этом транзистор сохраняет тепловую стабильность. Это говорит о том, что производители транзисторов неоправданно завышают значения предельных напряжений “коллектор-эмиттер”.

С целью проверки достоверности выполнено сравнение результатов численного анализа по представленной модели и результатов специальных экспериментов. Из таблицы 2 видно, что имеет место достаточно хорошее совпадение расчетных температур с экспериментальными данными.

Относительная погрешность не превышает 10.3% в случае умеренных интенсивностей тепловыделений. С увеличением рассеиваемой мощности относительная погрешность уменьшается в среднем до 5%.

Таблица 2 – Расчетные и измеренные средние температуры поверхностей эмиттерных полос.

Uкэ, В Iк, А	Температура полосы №3		Температура полосы №6		Температура полосы №8		Температура полосы №1		Макс погр. %
	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	
10В, 1А	41.8	42.5	42.5	42.7	42.2	42.1	41.2	41.7	10.3
10В, 2А	49.1	50.4	50.5	50.7	49.7	49.4	48.0	48.7	9.2
10В, 3А	55.9	57.7	57.8	58.2	56.5	56.2	54.8	55.3	8.6
20В, 1А	49.2	50.5	51.2	50.9	50.2	49.5	48.2	48.7	4.9
20В, 2А	65.1	66.9	68.4	67.8	66.1	64.8	63.0	63.3	5.9
20В, 3А	79.7	82.6	83.6	84.1	79.9	79.4	76.9	77.0	6.5
30В, 1А	56.5	57.8	59.4	58.6	57.2	56.3	54.7	55.2	6.0
30В, 2А	80.6	82.6	85.9	84.5	81.4	79.4	77.0	76.6	4.4
30В, 3А	102.6	107.0	108.4	110.2	101.8	101.9	98.1	97.4	6.5
40В, 1А	66.1	67.1	69.8	68.5	66.2	64.9	63.2	63.0	4.2
40В, 1.5А	82.4	84.5	88.0	87.0	82.3	81.1	78.1	77.7	2.5
50В, 1А	74.6	75.7	79.9	78.1	74.4	73.0	70.5	70.0	4.5
50В, 1.5А	96.0	98.2	104.1	103.1	95.1	94.1	90.2	88.2	3.9
60В, 1А	83.0	84.0	90.3	88.0	82.2	81.0	77.6	76.2	4.2
60В, 1.5А	109.1	110.9	120.2	121.4	107.1	107.4	101	97.0	6.0
80В, 0.5А	67.6	67.0	72.3	69.7	66.7	65.2	63.2	62.1	7.5
80В, 0.8А	84.6	87.2	99.2	97.3	86.6	86.7	77.0	77.6	5.3

Выводы. Заключение

1. Впервые решена пространственная нелинейная нестационарная задача теплопроводности в корпусе биполярного транзистора с учетом температурной зависимости токов.
2. Впервые получены нестационарные пространственные распределения температур кристалла.
3. Впервые получены распределения плотности тока эмиттерных полос с учетом пространственного распределения температурного поля и влияния сопротивления металлизации.
4. Впервые получены динамические вольтамперные характеристики с учетом нестационарного пространственного температурного поля.
5. Проведены экспериментальные исследования температур поверхности кристалла типичного биполярного транзистора, получено хорошее соответствие с расчетными температурами.

Публикации по теме диссертации

1. Кузнецов Г.В., Белозерцев А.В. Численное моделирование пространственного поля температур в силовом транзисторе//Радиотехника, 2006, № 3. С.62-66.
2. Кузнецов Г.В., Белозерцев А.В. Экспериментальное исследование полей температур поверхности кристалла мощного биполярного транзистора. // Электроника. Известия вузов, 2007, № 1. С.22-27.
3. Кузнецов Г.В., Белозерцев А.В. Численное моделирование температурных полей силовых транзисторов с учетом разрывов коэффициентов переноса. //Известия Томского политехнического университета. - Томск: Изд. ТПУ, 2005- Т. 308, - № 1. - С.150-155.
4. Кузнецов Г.В., Белозерцев А.В. Математическое моделирование теплопереноса в силовой электронике. Сб. материалов 2-й Международной научно-технической конференции. Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. С.106-108.
5. Белозерцев А.В., Кузнецов Г.В. О прогнозировании характеристик процессов переноса зарядов в условиях неоднородных полей температур. Сопряженные задачи механики, информатики и экологии. Материалы Международной конференции 5-10 июля 2004 г. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. 32 с.
6. Белозерцев А.В., Кузнецов Г.В. Численное моделирование пространственного поля температур в силовом транзисторе с учетом температурной зависимости токов. Депонированная статья № 840-В2006, ВИНТИ, 2006.-18 с.: ил.
7. Белозерцев А.В., Кузнецов Г.В. Численное моделирование трехмерного распределения температур в мощном транзисторе. Депонированная статья № 842-В2006, ВИНТИ, 2006.-13 с.: ил.
8. Белозерцев А.В. Температурные поля силовых транзисторов. Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Материалы V Всероссийской конференции 2006 г. Томск: Издательство Том. Ун-та, 2006.-С.472-473.