

6. Письменный Є.М., Рогачов В.А., Терех О.М., Бурлей В.Д., Мариненко В.І. Теплообмінна труба. Патент на винахід. Україна. №60124А. 15.09.2003. Бюл. №9.

7. Weirman C. Correlations Ease the Selections of Finned Tubes// Oil and Gas J. – 1976. – Vol.74, № 36. – P. 94–100.

8. Терех А.М. Теплообмен и аэродинамика поперечно-омываемых пучков труб с винтовым, подогнутым и сегментным оребрениями. Дис. ... канд.техн.наук. – Киев, 1997. – 160 с.

9. Левченко Г.И. и др. Оребренные поверхности нагрева паровых котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.

10. РТМ 108.030.140-87. Расчет и рекомендации по проектированию поперечно-оребранных конвективных поверхностей нагрева стационарных котлов. – Л.: Минэнергомаш, 1988. – 30 с.

11. Escoa Fintube Corp Turb – X (Нормативный метод расчета корпорации). – USA, 1979. – 33 с.

Получено 21.03.2007 г.

УДК 621.396.6

КУЗНЕЦОВ Г.В.<sup>1</sup>, БЕЛОЗЕРЦЕВ А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Томский государственный университет

## МОДЕЛЬ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Числово розв'язано тривимірну нестационарну задачу теплопровідності корпусу біполярного транзистора з вісьмома джерелами тепловиділення загальною потужністю 60 Вт з врахуванням конструктивних відмінностей таких напівпровідникових приладів. Встановлено, що просторове моделювання температурних полів у такому складному об'єкті дає змогу істотно, у порівнянні з простими балансними моделями, підвищити ступінь деталізації розподілу температур.

Численно решена трехмерная нестационарная задача теплопроводности в корпусе силового биполярного транзистора с восьмью источниками тепловыделения общей мощностью 60Вт с учетом конструктивных особенностей таких полупроводниковых приборов. Установлено, что пространственное моделирование температурных полей в таком сложном объекте позволяет существенно, по сравнению с простейшими балансными моделями, повысить степень детализации распределений температур.

Numerically study a three dimensional temperature field in power bipolar transistors case with eight heat sources. Summary power dissipation is 60 watts. Calculation is made with allowance for real geometrical and design features of the transistor. It is established, that three dimensional modeling of temperature fields allows enhancing accuracy of estimation of transistors temperature distributions in comparison with the elementary balancing models.

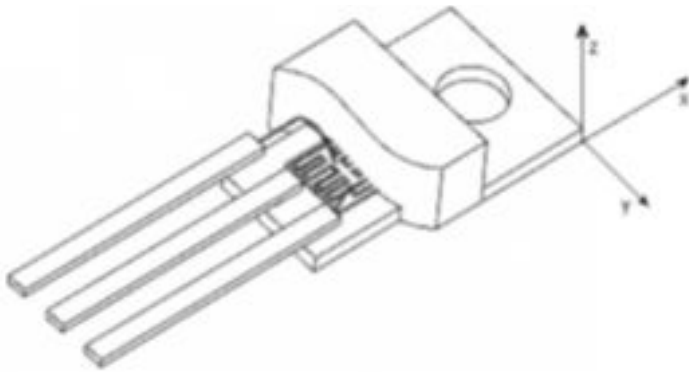
$L$  – линейный размер по оси;  
 $P$  – мощность тепловыделения;  
 $Q$  – интенсивность тепловыделения;  
 $S$  – площадь поверхности;  
 $T$  – температура;  
 $V$  – объем;  
 $c$  – объемная теплоемкость;  
 $t$  – время;

$x, y, z$  – координаты;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи или теплопередачи;  
 $\rho$  – плотность;  
 ППП – полупроводниковый прибор.  
**Индексы:**  
 $x, y, z$  – по координатам  $x, y, z$ ;  
 $c$  – внешняя среда.

### Введение

С увеличением степени интеграции и числа радиоэлементов в современной электронной ап-

паратуре повышенные требования предъявляются к надежности отдельно взятого компонента. Силовые элементы являются самыми уязвимыми по показателям долговечности любого устройст-



**Рис. 1. Внешний вид транзистора.**

ва. Известно, что надежность любого радиоэлемента во многом зависит от обеспечения теплового режима работы. Рассеиваемые мощности современных полупроводниковых приборов (ППП) составляют сотни ватт. При таких интенсивностях тепловыделения возникает задача определения фактической температуры кристалла ППП. Максимальные рабочие температуры кристаллов биполярных транзисторов составляют порядка 125...150 °С [1]. С повышением температуры резко ускоряются процессы деградации кристалла, ухудшается ряд электрических характеристик [2]. В настоящее время температуры кристаллов ППП в стационарном режиме рассчитываются исходя из теплового сопротивления перехода кристалл-корпус, а температуры нестационарного режима – по так называемой “нульмерной” модели [2]. В [3] показано, что применение “нульмерной” модели при расчете температур в типичном узле РЭА – печатной плате с активным элементом малой рассеиваемой мощности (около 1,5 Вт) приводит к существенно заниженным результатам по сравнению с двумерной моделью теплопроводности. Ниже будет показано, что при рассеиваемых мощностях в несколько десятков ватт в корпусе транзистора также формируется существенно неоднородное поле температур и применение балансной модели вызывает значительную погрешность определения  $T$ . В [4] проведен численный анализ трехмерных температурных полей в кристалле БИС при относительно низких рассеиваемых мощностях 1,5 Вт. Увеличение  $Q$  в десятки и сотни раз приводит не только к интенсификации процессов теплопереноса в полупроводниковом при-

боре и соответствующим градиентам  $T$ , но и к значительному быстрому росту температуры, что создает серьезные проблемы в реализации алгоритмов любой процедуры численного решения. Так, например, нарушаются условия консервативности ряда разностных схем [5], и для реализации любого численного алгоритма необходим специальный поиск сеточных параметров, обеспечивающих при таких сложных вычислениях выполнение закона сохранения энергии [5].

Экспериментальное же измерение распределений  $T$  в работающем ППП практически невозможно без нарушения структуры последнего.

Целью данной работы является прогностическое моделирование пространственных температурных полей силовых биполярных транзисторов с высокой (до 200 Вт) рассеиваемой мощностью с учетом всех основных факторов: нестационарности процесса, локальности тепловыделения, пространственной неоднородности коэффициентов теплопереноса, неоднородности граничных условий на охлаждаемых поверхностях.

### **Постановка задачи**

Рассматривается типичный вариант исполнения полупроводниковых приборов в корпусе ТО–220. За основу взят широко распространенный транзистор КТ819Г. Транзистор выполнен в металлопластиковом корпусе (рис.1). Основой корпуса является медное основание (зоны 1,3) толщиной 1,22 мм (рис. 2), к которому припаян полупроводниковый кристалл (зона 4). Пластик закрывает кристалл и часть медного основания (зоны 2,3,4).

На рис. 2 цифрами отмечены следующие области: 1 – пластик, 2 – пластик над медным основанием, 3 – кристалл на медном основании в пластике, 4 – базовое медное напыление на кристалле, 5 – эмиттерное медное напыление на кристалле, 6 – восемь источников тепловыделения (заштрихованные области).

В кристалле находятся 8 транзисторов. Электроды соединены параллельно на поверхности кристалла медным напылением толщиной около 15мкм. Транзистор имеет тепловой контакт с радиатором. Температура радиатора принята равной температуре окружающей среды. Тепловой

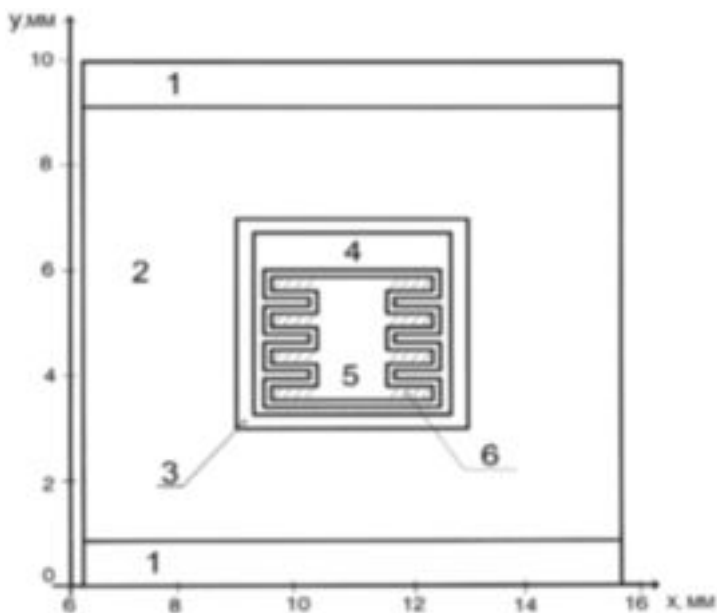


Рис. 2. Схема области решения в плоскости  $x$ - $y$  при  $z = 1,475$  мм.

контакт между транзистором и радиатором осуществляется применением теплопроводящей пасты КПП-8. Толщина пасты принята равной 25 мкм, её коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,8$  Вт/(м·К). С верхней и боковых границ корпуса осуществляется конвективный теплообмен с внешней средой.

При постановке задачи приняты следующие допущения:

1) В медном основании (зона 1) не учитывается наличие крепежного отверстия. Численный эксперимент показывает, что градиент температуры в этой зоне мал, поэтому отсутствие отверстия в этой зоне слабо влияет на распределение температур.

2) Не учитываются выводы транзистора. Поскольку они вплавлены в пластик с низкой теплопроводностью, а к кристаллу припаяны тонкими проволочками, выводы не имеют хорошего теплового контакта с областью интенсивного тепловыделения.

3) Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи не зависят от температуры.

4) Температура радиатора постоянна и равна температуре внешней среды.

В таблице приведены теплофизические характеристики материалов.

В такой постановке задача сводится к решению уравнения теплопроводности:

$$c(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [\lambda(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [\lambda(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [\lambda(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial z}] + Q(x, y, z). \quad (1)$$

Начальное условие:

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

На всех границах области решения используются граничные условия 3-го рода:

$$x = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2(T_c - T), \quad x = L_x, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2(T_c - T);$$

$$y = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_2(T_c - T), \quad y = L_y, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_2(T_c - T);$$

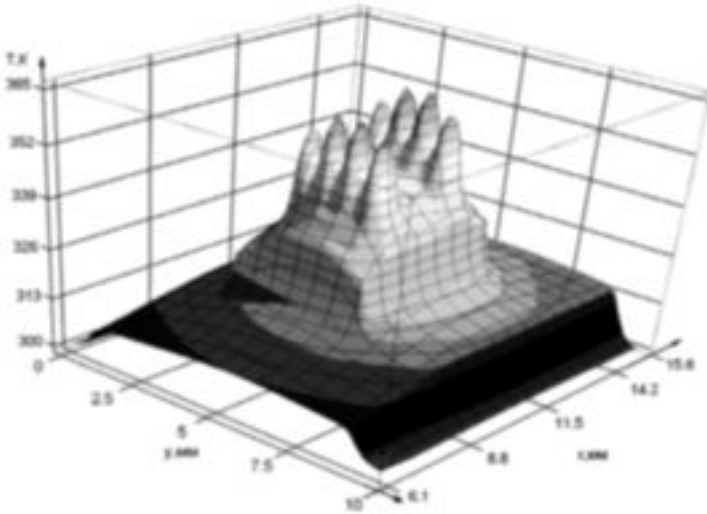
$$z = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_2(T_c - T), \quad z = L_z, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_1(T_c - T),$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплопередачи между нижней поверхностью и радиатором,  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи с боковых и верхней поверхностей корпуса транзистора.

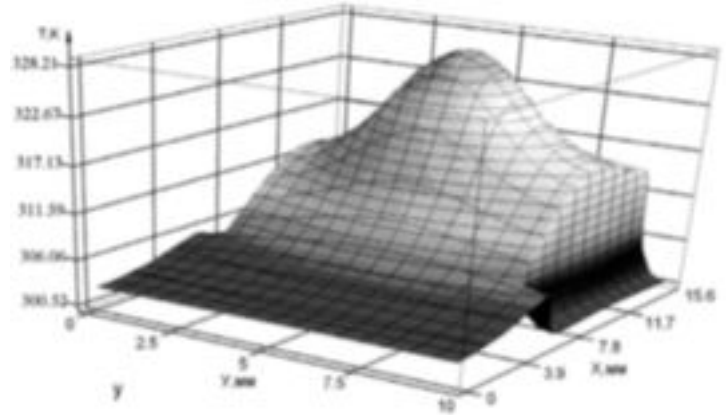
Сформулированная задача решена методом расщепления по координатам, разностные аналоги одномерных уравнений решены методом прогонки[6].

Пространственное моделирование показывает, что температура кристалла после  $t = 0,9$  с достигнув 353 К, изменяется менее чем на 1 К. Можно считать, что нагрев кристалла прекращается при  $t > 1$  с. В дальнейшем происходит повышение температуры только пластикового корпуса. На рис. 3 показано поле температур верхней поверхности ( $z = 1,475$  мм) кристалла при  $t = 0,9$  с. На рис. 4 показано поле температур нижней поверхности корпуса ( $z = 0$ ) при  $t = 0,9$  с.

Из рис. 3 видно, что температурное поле в кристалле кремния существенно неоднородно, перепад температур по области кристалла составляет до 23 К. Из рис. 4 видно, что перепад температур по нижней поверхности составляет около 28 К. При этом область медного основания, где должно находиться крепежное отверстие, практически не участвует в отводе теплоты от активной зоны транзистора.



**Рис. 3. Температуры верхней поверхности кристалла при  $z = 1,475$  мм,  $t = 0,9$  с.**



**Рис. 4. Температуры нижней поверхности корпуса транзистора при  $z = 0$ ,  $t = 0,9$  с.**

Для обоснования вывода о необходимости применения пространственной модели теплопроводности при анализе температурных полей ППП проведено сравнение с результатами расчета по традиционной [2] модели, не учитывающей пространственный характер переноса теплоты в транзисторе.

Расчет средней по объему температуры проведен с использованием уравнения:

$$V_{\text{ср}} \frac{\partial T}{\partial t} = P + \alpha_1 S_1 (T_c - T) + \sum_{i=2}^6 S_i \alpha_2 (T_c - T), \quad (2)$$

где  $S_1$  – площадь контакта медного основания с радиатором,  $S_i$  – площади открытых 5-ти поверхностей.

Зависимость средней по объему температуры корпуса от времени при  $P = 60$  Вт,  $S = 1,4$  см<sup>2</sup>,  $\alpha_1 = 32 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $\alpha_2 = 2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) приведена на рисунке 5.

Из рис. 5 видно, что стационарный режим достигается после 4-й секунды прогрева при темпе-

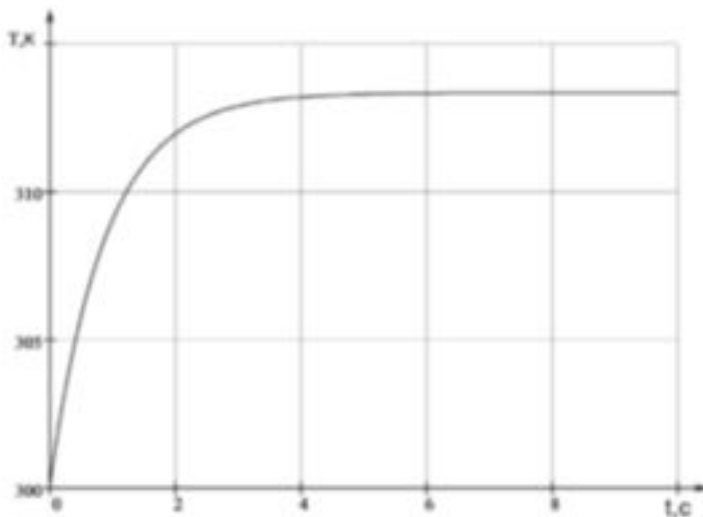
ратуре около 313 К. При применении пространственной модели температуры в малых по размерам зонах тепловыделения кристалла достигают максимума быстрее в 3...4 раза, чем это можно получить из модели (2).

С помощью балансной модели относительно точно можно определить лишь среднюю температуру нижней медной поверхности прибора при перепаде температур по этой поверхности около 28 °С. Следует отметить, что перегрев типичных радиаторов, применяемых для таких рассеивающих мощностей без принудительной вентиляции составит около 40...50 °С. К этому при анализе теплового режима следует добавить градиент температур непосредственно возле границы контакта с корпусом транзистора. Таким образом, температуры активных областей кристалла будут близки к предельным рабочим температурам.

Применение математических моделей, не учитывающих пространственную неоднородность полупроводниковых силовых приборов [2], ранее было обосновано целым рядом причин: простотой реализации такого метода расчета температур; отсутствием надежных методов решения пространственных нелинейных задач теплопро-

Табл. Теплофизические характеристики материалов

	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Медь	390	8930	365
Пластик	2000	1500	0,8
Кремний	712	2300	159



**Рис. 5. Зависимость температуры ППП от времени.**

водности для таких сложных приборов как, например, транзистор; отсутствием объективных данных о масштабах неоднородностей температурных полей ППП; очень большими временами вычислений для решения пространственных задач; неочевидностью проблемы учета существенной пространственной неоднородности температурных полей современных полупроводниковых приборов. Но результаты [7] показывают, что при повышении температуры кристалла до 130 °С в кристалле возникают достаточно высокие термические напряжения, при которых достигаются условия малоциклового усталости. До выхода из строя прибора при таком перегреве требуется от 20 тысяч до 100 тысяч циклов “нагрев-охлаждение” [7]. Учитывая быстрые времена разогрева прибора, такое количество циклов в реальной аппаратуре возможно в течение нескольких суток интенсивной работы ППП.

Результаты проведенных численных исследований показывают также, что учёт реальной структурной неоднородности полупроводниковых приборов (локальность источников тепловыделения, различия в теплофизических характеристиках материалов отдельных элементов и зон транзисторов, реальная конфигурация отдельных элементов) создаёт объективные условия для выделения зон ППП с высокими локальными градиентами температур и, соответственно, с местными значениями температур, существенно

превышающими значения  $T$  соседних элементов. Это важно, потому что местный локальный перегрев транзистора даже на участке площадью менее одного квадратного миллиметра достаточен для выхода из строя ППП.

Следует особо отметить, что установленные закономерности характерны для современных широко распространенных в радиоэлектронной аппаратуре и в электронной технике силовых транзисторов. Но современные тенденции развития радиоэлектронной и вычислительной техники показывают, что при сохранении двух основных целей этого развития – миниатюризации и энергонасыщения любых радиотехнических и электронных систем значимость рассматриваемых в данной работе проблем будет расти. Соответственно будут повышаться в цене и усложняться любые алгоритмы экспериментальной отработки как полупроводниковых приборов, так и любых систем на их основе. Поэтому роль пространственного моделирования на базе развивающихся математических моделей в ближайшее время будет неуклонно расти. В этой связи полученные результаты создают определенные предпосылки для дальнейшего развития теоретических основ проектирования радиоэлектронной техники.

### **Заключение**

Полученные в данной работе результаты показывают, что пространственное моделирование температурных полей таких сложных энергонасыщенных технических устройств как силовые биполярные транзисторы позволяет существенно повысить точность вычисления локальных температур по сравнению с относительно простыми балансными моделями [2]. Также установленные закономерности позволяют сделать вывод о целесообразности перехода при создании новых полупроводниковых приборов к физическим, геометрическим и математическим моделям, учитывающим существенную структурную неоднородность конструкции ППП. В этом случае возможно выделение зон с высокими локальными градиентами температур, в которых осуществляется местный перегрев электрорадиоэлементов до температур, значения которых достаточно суще-

ственно превышают допустимые рабочие температуры ППП.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности: Справочник.* – М.: Радио и связь, 1989. – 640 с.

2. *Дульнев Г.Н.* Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М: Высш. шк., 1984. – 247 с.

3. *Алексеев В.П., Кузнецов Г.В., Шлома С.В.* Расчет температурного поля печатной платы с учетом конвективного и радиационного теплообмена на поверхности платы // Инж.-физ. журнал. – 2002. – Т. 75, №5. – С. 177–179.

4. *V.P. Alekseev, G.V. Kuznetsov and S.V. Shloma.* Forecasting the reliability of radio components by three-dimensional thermophysical modeling // Journal of Engineering Thermophysics. – 2002. – V. 11, №4. – P. 311–320.

5. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

6. *Самарский А.А.* Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.

7. *A. Morozumi, K. Yamada, T. Miyasaka* // Reliability Design Technology for Power Semiconductor Modules. fuji electric review. – 2004. – V. 47, №2. – P. 54–58.

*Получено 21.03.2007 г.*