

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОВАЯ СТРУКТУРНАЯ ФУНКЦИЯ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

© Н. Л. Евдокимова, В. С. Ежов, К. А. Иванов

ОАО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной пр., 27

В статье рассмотрен тепловой анализ полупроводниковых приборов с использованием аналитической тепловой структурной функции. Методом численного моделирования исследованы различные конструкции. Показано, что при отсутствии радиального растекания теплового потока, погрешность теплового анализа с использованием аналитической тепловой структурной функции K^* менее 5 %. Это позволяет на практике определять свойства материалов или сечение теплового потока. В случае радиального растекания тепловой анализ лучше проводить с применением аналитической теплоёмкости C^* . Изменение угла наклона зависимости теплоёмкости $\lg C^* = f(Rt)$ от теплового сопротивления позволяет идентифицировать сопротивления отдельных слоёв, составляющих многослойную структуру. Полученные результаты могут быть использованы при тепловом анализе брака в полупроводниковых приборах.

Ключевые слова: тепловое сопротивление, тепловое моделирование, тепловая структурная функция

Сведения об авторах: Евдокимова Наталья Львовна, к.т.н., atali.evdokimova@mail.ru; Ежов Владимир Самуилович, к.т.н., v_ejov@pulsarnpp.ru; Иванов Кирилл Андреевич, pulsar@dol.ru

ANALYTICAL THERMAL STRUCTURAL FUNCTION. NUMERICAL MODELING

N. L. Evdokimova, V. S. Ejov, K. A. Ivanov

JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

This article presents the thermal analysis of semiconductor devices, which used analytical thermal structural function. The different constructions were researched by the thermal modeling. It was found that without radial propagation of thermal stream the mistake of the thermal analysis, which used analytical thermal structural function K^* , was less than 5 %. It allows analytically to define properties of a material or cross-sectional area of a thermal stream. In the case of radial propagation of the thermal stream it is better to use analytical thermal capacitance C^* . The change of the slope of the dependence $\lg C^* = f(Rt)$ allows to identify the separate elements of multilayer structures. These results may be used for the thermal analysis of defects in the semiconductor devices.

Keywords: thermal resistance, thermal modelling, thermal structural function

Data of authors: Evdokimova Natalia Lvovna, Ph.D., atali.evdokimova@mail.ru; Ejov Vladimir Samuilovich, Ph.D., v_ejov@pulsarnpp.ru; Ivanov Kirill Andreevich, pulsar@dol.ru

Введение

В последние годы нашёл широкое применение метод анализа тепловых сопротивлений полупроводниковых приборов по кривым нагрева или охлаждения (зависимости теплового сопротивления R_t от времени t)

с применением тепловой структурной функции [1-4]. Для теплового анализа используют кумулятивную (интегральную) структурную функцию – теплоёмкость C и дифференциальную структурную функцию – производную теплоёмкости по тепловому сопротивлению

$K = dC/dR_t$. Метод позволяет находить физические свойства материалов и площадь сечения теплового потока в различных элементах конструкции полупроводниковых приборов. В [3-4] метод был использован для определения теплопроводности материалов.

В [5] для упрощения методики теплового анализа были введены аналитическая теплоёмкость C^* (как количество тепла ΔQ , приводящее к повышению температуры поверхности кристалла T_{KP} на один градус) и аналитическая дифференциальная структурная функция K^* :

$$C^* = \frac{\Delta Q}{\Delta T_{KP}} = \frac{Pt}{\Delta T_{KP}} = \frac{t}{R_t}, \quad (1)$$

где P – мощность, подаваемая на прибор.

$$K^* = \frac{dC^*}{dR_t}. \quad (2)$$

Они были введены в приближении одномерной задачи для случая, когда задан тепловой поток на одной поверхности и он не доходит до границы другой поверхности (граничные условия второго рода). Поэтому возникла необходимость исследовать применимость и оценить погрешность использования введённых в [5] аналитических функций C^* и K^* для определения параметров теплового потока.

Постановка задачи

В данной работе методом численного моделирования рассмотрено их поведение для разных конструкций при отсутствии и при наличии радиального растекания. Определена погрешность использования аналитической структурной функции K^* для теплового анализа при отсутствии радиального растекания. Показана применимость использования аналитической теплоёмкости C^* при анализе брака в транзисторных структурах с радиальным растеканием теплового потока.

Программа и модель

Для расчётов использовалась программа ANSYS Icerak. Суть моделирования заключалась в итерационном решении 3D нестационарного уравнения теплопередачи в твёрдом теле:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T),$$

где ∇ – оператор Гамильтона,

T – температура,

λ – теплопроводность,

ρ, c_p – плотность и теплоёмкость,

t – время.

Были рассмотрены две конструкции, показанные на рис. 1.

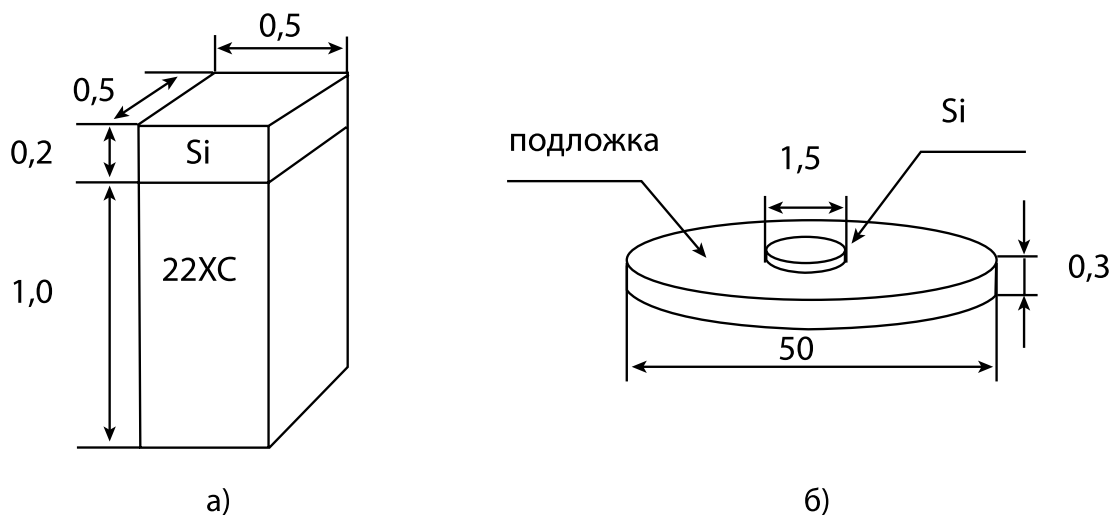


Рис. 1

Конструкции, используемые для численного моделирования (размеры – в миллиметрах)

В первой конструкции, состоящей из двух слоёв (кремния и керамики) одной площади (рис. 1а), тепловой поток идёт сверху вниз (задача 1). Во второй конструкции, кристалл кремния толщиной 0,2 мм лежит на подложке толщиной 0,3 мм (рис. 1б) и тепловой поток растекается радиально по подложке (задача 2). В задаче 1 теплоотвод находился на нижней поверхности подложки. Источник тепла моделировался как поверхность, на которой задано граничное условие:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q = \frac{P}{S},$$

где n – нормаль,
 q – тепловой поток,
 P – мощность рассеиваемая в тепло,
 S – площадь источника тепла.

В задаче 2 теплоотвод осуществлялся через боковые стороны круглой пластины. На теплоотводе было задано условие Дирихле $T = 20$ °С. Остальные границы были теплоизолированы. Свойства материалов не зависели от температуры.

Алгоритм моделирования состоял из следующих действий:

1. Уравнение теплопроводности в твёрдом теле решалось на некотором наборе вложенных сеток с помощью метода контрольного объёма. Для аппроксимации по времени использовалась полностью неявная схема.

2. Отрезок времени разбивался на шаги, и на каждом шаге по времени решалась линейная задача, зависящая от температур, полученных в предыдущем шаге по времени. Для решения линейной задачи использовался многосеточный подход.

3. Последовательно, переходя от шага к шагу, покрывался весь отрезок времени. В конце каждого шага по времени осуществлялся вывод максимальной температуры в текстовый файл.

Обработка результатов численного моделирования

В результате численного моделирования было получено распределение температуры по структуре и была определена максимальная по структуре температура для разных момен-

тов времени. По отклонению максимальной температуры от температуры теплоотвода, была найдена зависимость теплового сопротивления от времени – тепловая переходная характеристика, по которой была рассчитана аналитическая тепловая структурная функция [5]. В отличие от экспериментальной кривой рассчитанная тепловая переходная характеристика не имеет экспериментального шума, и поэтому ее обработка не требовала предварительной аналитической аппроксимации.

Последовательность действий была следующей. Из массива времени t_i и массива соответствующей этому моменту максимальной температуры $T_{max i}$ был рассчитан массив теплового сопротивления $R_{t i}$:

$$R_{t i} = \frac{T_{max i} - T_0}{P}. \quad (3)$$

По формуле (1) определялся массив теплоёмкости C^*_i :

$$C^*_i = \frac{t_i}{R_{t i}}. \quad (4)$$

Затем при использовании (2) был найден массив аналитической дифференциальной структурной функции $K^* = dC^*/dR_t$ по формуле:

$$K^*_i = \frac{C^*_{i+1} - C^*_i}{R_{t i+1} - R_{t i}}. \quad (5)$$

Были рассмотрены особенности поведения аналитической теплоёмкости $C^* = f(R_t)$ и дифференциальной тепловой структурной функции $K^* = dC^*/dR_t = f(R_t)$ в разных конструкциях.

Для определения погрешности использования аналитической структурной функции K^* для теплового анализа было проведено сравнение значений аналитической дифференциальной структурной функции K^* (на участках с нулевой производной по тепловому сопротивлению R_t) со значением K^* , рассчитанным из параметров

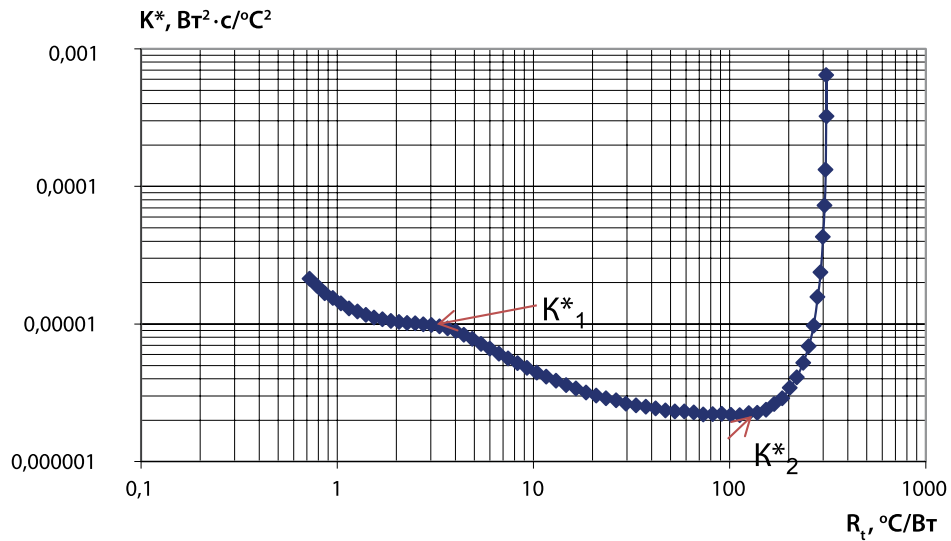


Рис. 2

Аналитическая структурная функция K^* первой конструкции

слоёв структуры, заложенных в расчётную модель, по формуле (10) из работы [5]:

$$K^* = \frac{\pi}{4} S^2 \lambda c \rho. \tag{6}$$

Результаты расчёта

Задача 1

Задача 1 рассматривает тепловой поток при отсутствии радиального растекания. Полученная по формуле (5) зависимость аналитической структурной функции K^* от теплового сопротивления дана на рис. 2. В начале тепловой поток идёт по кремнию

затем по керамике 22ХС, что соответствует значениям K^*_1 и K^*_2 на рис. 2. Для определения погрешности теплового анализа с использованием аналитической тепловой структурной функции сопоставим значения K^* в точках экстремумов со значениями K^* , рассчитанным по формуле (6), используя параметры структуры, заложенные в программу численного моделирования.

Результаты сравнения приведены в табл. 1. В первом столбце таблицы указаны материалы, заложенные в модель. Во втором, третьем и четвертом столбцах даны используемые в расчёте значения их удельной теплоёмкости, теплопроводности и плотности соответственно. В пятом столбце дано значение K^* , рассчитанное по (6)

Таблица 1

Физические свойства использованных материалов и полученные значения K^* (задача 1)

1	2 Удельная теплоёмкость c , Дж/кг/град	3 Теплопро- водность λ , Вт/м/К	4 Плотность ρ , кг/м ³	5 K^* из (6)	6 K^* из рис.2
Si	711	120	2330	9,8 E-6	$K^*_1 = 9,8 \text{ E-6}$
22ХС	837	14	3860	2,1 E-6	$K^*_2 = 2,2 \text{ E-6}$
SiC	715	370	3210		
C	520	1000	3500		

из данных второго, третьего и четвёртого столбцов. В шестом столбце даны значения аналитической тепловой структурной функции на участках с нулевой производной из рис. 2, полученные по формулам (1)-(3). Оценка погрешности теплового анализа с использованием аналитической тепловой структурной функции [5] проводилась из сопоставления значений пятого и шестого столбцов табл. 1.

Как видно из табл. 1, полученное из рис. 1 значение аналитической тепловой структурной функции K^* в точках с нулевой производной (столбец 6 табл. 1), совпадает со значением K^* , найденным по формуле (6) из параметров, заложенных в исходную модель (столбец 5 табл. 1), для кремния и отличаются менее чем на 5 % для керамики. Таким образом, погрешность определения параметров структуры по аналитической тепловой структурной функции K^* в точках с нулевой производной на графике $K^* = f(R_t)$ не превышает 5 %.

Задача 2

Задача 2 рассматривает случай радиального растекания теплового потока. Расчёт проводился для конструкции, по-

казанной на рис. 1б, для разных подложек: кремний, карбид кремния и алмаз.

Аналитическая структурная функция K^* , полученная из зависимости максимальной температуры T_{max} от времени после преобразований (3)-(5), приведена на рис. 3.

Рассмотрим график аналитической тепловой структурной функции, приведённый на рис. 3. В данной конструкции (рис. 1б) тепловой поток вначале шёл вниз по кремнию, затем вниз по подложке и затем радиально растекался по подложке. Минимум K^* соответствует кристаллу кремния. Падение теплового сопротивления на кристалле кремния примерно $0,6 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. У конструкций, отличающихся материалом подложки, минимум имеет место при одинаковом R_t и имеет одно и то же значение K^* . Из графика, приведённого на рис. 3, значение K^* в минимуме ($0,000506$) точно равно значению $\pi\lambda c\rho S^2/4$, вычисленному из теплофизических характеристик кристалла кремния, заложенных в расчёт задачи 2 (табл. 1). В случае кремниевой подложки минимум затянут (до $R_t = 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$), так как тепло идёт вниз структуры по кремнию. Начало участка возрастания K^* соответствует участку радиальному растеканию тепла по подложке.

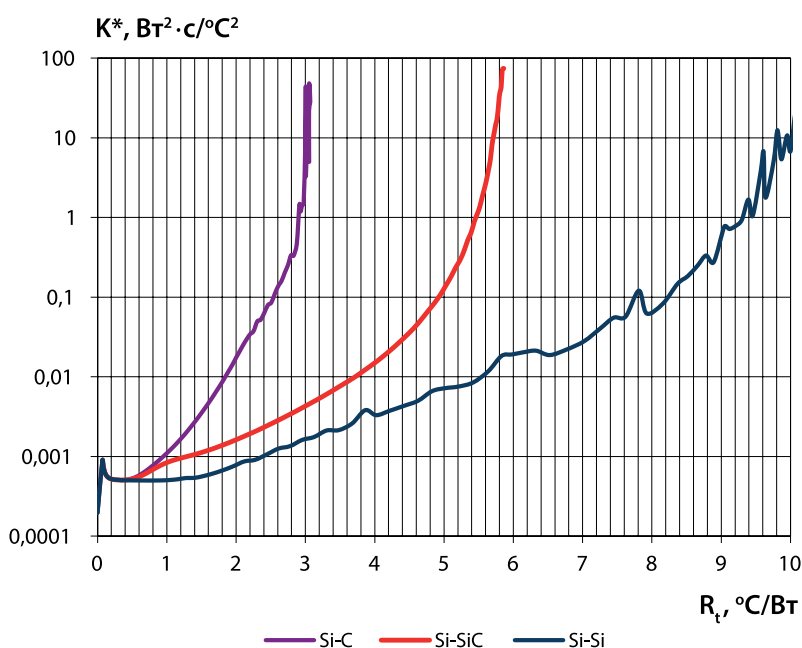


Рис. 3

Аналитическая структурная функция K^* второй конструкции

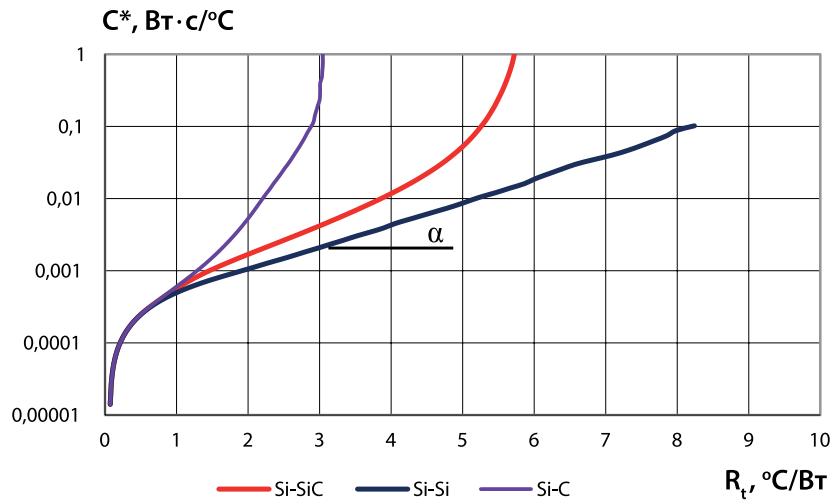


Рис. 4

Зависимость теплоёмкости C^* от теплового сопротивления

В [4] показано, что в случае радиального растекания тепла, кумулятивная (интегральная) структурная функция (теплоёмкость C) имеет вид:

$$C = w c_v \pi r_0^2 \exp(4 \pi w \lambda R_t), \tag{7}$$

где w – толщина подложки,
 c_v – объёмная теплоёмкость,
 r_0 – радиус контактной площадки.

Из (7) следует, что теплоёмкость C в полулогарифмическом масштабе линейно возрастает с увеличением R_t и тангенс угла наклона α пропорционален теплопроводности λ и толщине пластины w :

$$\operatorname{tg} \alpha = 4 \pi w \lambda. \tag{8}$$

Нам было важно узнать, справедливо ли это соотношение для нашей аналитической теплоёмкости C^* применительно к нашим конструкциям, в которых кроме радиального растекания присутствует перенос тепла через кристалл кремния. График полученной по (2) функции $C^* = f(R_t)$ приведён на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что также как в [3] и [4] участок линейного возрастания логарифма теплоёмкости C^* есть на всех кривых, соответствующих разным подложкам. Чем больше теплопроводность, тем больше угол наклона. Однако тангенс угла наклона линейного участка в нашем случае не был

пропорционален произведению λw . Полученная из нашего расчёта зависимость тангенса угла наклона от теплопроводности при $w = 0.3$ мм показана синим цветом на рис. 5.

Полученная по формуле (8) из [4] линейная зависимость тангенса угла наклона от теплоёмкости построена красным цветом. Кривые отличаются наличием в нашем расчёте участка (синяя кривая), где $\operatorname{tg} \alpha$ не зависит от λ . Возможной причиной отличия является неудовлетворительность аналитической модели (описывающей идеальное растекание), представленное формулами (7) и (8) для описания рассматриваемых в данной работе структур.

Было проведено исследование влияния толщины подложки w , плотности ρ и удельной теплоёмкости C на тангенс угла наклона. Оказалось, что наклон линейного участка для кривых, отличающихся w , ρ и C , при соблюдении условия $w_1 \lambda_1 = w_2 \lambda_2$ был одинаковым. Это означает, что наклон при одинаковых геометрических размерах зависит только от произведения $w \lambda$. Полученные данные показывают, что при наличии радиального растекания можно идентифицировать путь теплового потока по тангенсу угла наклона зависимости $\lg C^* = f(R_t)$. Изменение наклона свидетельствует о переходе теплового потока к другому слою. Это позволяет определять тепловые сопротивления отдельных слоёв многослойных струк-

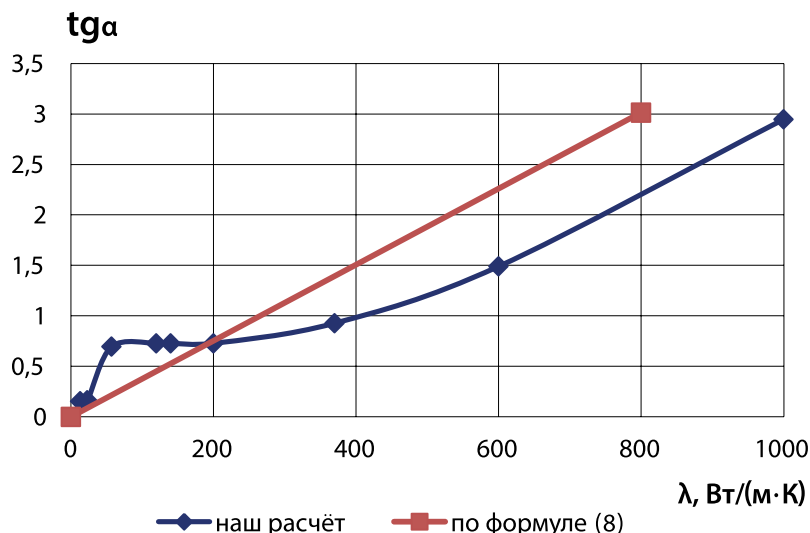


Рис. 5

Зависимость тангенса угла наклона $\lg C^* = f(R_t)$ от теплопроводности

тур и, как следствие, анализировать причины брака по тепловому сопротивлению.

Использование аналитической теплоёмкости C^* для анализа брака транзисторных структур по тепловому сопротивлению

Рассмотрим структуру многослойного транзистора на GaN, состоящую из слоёв GaN, SiC, припоя AuSn, Cu, припоя AuSn, и корпуса из сплава МД-40.

Для тепловых расчётов полупроводниковых структур нами была использо-

вана программа [6]. В этой программе для рассмотренного выше транзистора на GaN была рассчитана зависимость аналитической теплоёмкости C^* от теплового сопротивления R_t для транзисторов с разным числом структур на кристалле. Результат расчёта представлен на рис. 6. Статическое тепловое сопротивление соответствует значению резкого возрастания теплоёмкости. Экспериментальные значения тепловых сопротивлений многослойных транзисторов на GaN с учётом разброса показаны горизонтальными участками соответствующего цвета.

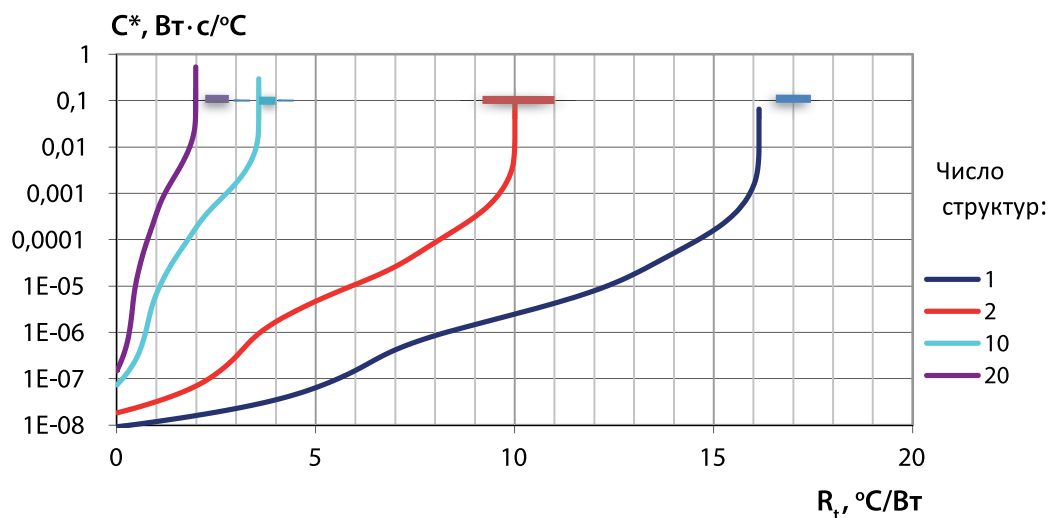


Рис. 6

Зависимость аналитической теплоёмкости C^* от теплового сопротивления R_t

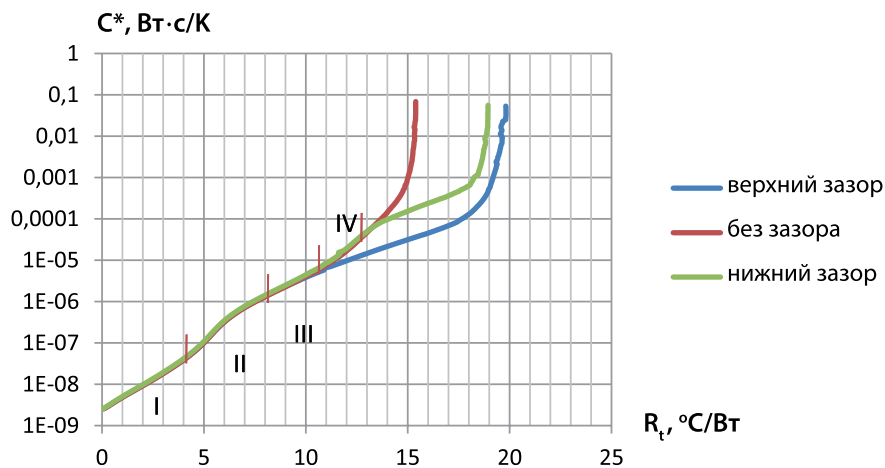


Рис. 7

Влияние зазора в припое на зависимость теплоёмкости C^* от теплового сопротивления

Кривая аналитической теплоёмкости C^* состоит из нескольких участков, в пределах которых наблюдается линейное возрастание логарифма теплоёмкости при увеличении теплового сопротивления. Более подробно деление на участки рассмотрим на примере транзистора, состоящего из одной структуры рис. 7. Участки I, II, III, IV соответствуют слоям GaN, SiC, припоя AuSn и Cu.

Рассмотрим, как найти место брака по тепловому сопротивлению, используя идентификацию участков графика теплоёмкости $C^* = f(R_t)$. Основной брак при сборке происходит в результате плохой пайки. При этом в месте спая появляются пустоты и уменьшается площадь сплавного контакта. В данной конструкции два сплавных соединения. Это слои припоя AuSn. Промоделируем плохую пайку наличием зазора в слое припоя AuSn. Верхний слой припоя между кристаллом и медной прокладкой имел зазор (пустоты), составляющий 60 % от размера кристалла. Нижний слой припоя между медной прокладкой и корпусом из сплава МД-40 имел зазор порядка 23 % от площади медной прокладки. На рис. 7 показана зависимость теплоёмкости C^* для структур с верхним и нижним зазором и без зазора.

Как видно из рис. 7 появление зазоров как верхнего, так и нижнего, увеличивает тепловое сопротивление. Кривая теплоёмкости структуры с верхним зазором

при $R_t = 10,5$ °C/Вт после слоя III (AuSn) отклоняется от кривой теплоёмкости структуры без зазора. При этом наклон кривой теплоёмкости не меняется. Постоянство наклона означает, что на этом участке тепловой поток идёт также по слою AuSn. Тепловое сопротивление слоя AuSn при наличии верхнего зазора возросло от 2 до 8 °C/Вт. Влияние нижнего зазора проявляется после IV слоя – меди при $R_t = 12,5$ °C/Вт. Наклон кривой теплоёмкости структуры с нижним зазором при $R_t > 12,5$ °C/Вт соответствует нижнему слою припоя AuSn, в котором промоделированы пустоты. Таким образом, сравнение зависимостей $C^* = f(R_t)$ бракованного прибора и годного позволит на практике определять место некачественного спая.

Выводы

Методом численного моделирования исследовано поведение аналитической тепловой структурной функции в различных конструкциях. В результате расчётов установлено, что:

1. При отсутствии радиального растекания тепла:

- Тепловой анализ можно проводить с применением аналитической дифференциальной структурной функции K^* .
- Параметр $\lambda c p S^2$, характеризующий тепловой поток, нужно определять на участках с

нулевой производной (горизонтальных участках либо в экстремумах) функции $K^* = f(R_i)$.

- Погрешность определения значения $S^2 C^* \lambda^* \rho$ из аналитической структурной функции составляет менее 5 %.

2. При наличии радиального растекания тепла:

- Тепловой анализ лучше проводить с применением аналитической теплоёмкости C^* .

- Участку радиального растекания тепла соответствует линейный участок зависимости $\lg C^* = f(R_i)$.

- Наклон зависимости $\lg C^* = f(R_i)$ (при одинаковых геометрических размерах структур) зависит только от произведения $i\lambda$.

- Зависимость тангенса угла наклона от произведения $i\lambda$ нелинейна.

3. По изменению угла наклона зависимости теплоёмкости $\lg C^* = f(R_i)$ от теплового сопротивления можно найти тепловые сопротивления отдельных слоёв, составляющих многослойную структуру.

4. Полученные результаты могут быть использованы при тепловом анализе брака в полупроводниковых приборах.

Литература

1. Székely V., Tran van Bien Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method. *Solid-State Electronics*, v. 31, № 9, 1988, pp. 1363-1368.
2. Rencz M., Székely V. Structure function evaluation of stacked dies. 20th IEEE SEMI-THERM Symposium, 2004.
3. Rencz M., Kollar E., Poppe A., Ress S. Evaluation issues of thermal measurements based on the structure functions – Proceedings of the 9th International Workshop on THERMal INvestigations of ICs and Systems (THERMINIC'03), 24-26 September, 2003.

4. Székely V., Rencz M., Torok S., Ress S. Calculating effective board parameters from transient measurements. *IEEE Tr. On Component and Packing Technology*, v. 24, № 4, 2002, pp. 605-610.
5. Евдокимова Н. Л., Ежов В. С., Минин В. Ф. Тепловой анализ полупроводниковых структур // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы.* – 2013. – № 1 (230). – С. 69-75.
6. Иванов К. А., Зубков А. М. Программа трёхмерного моделирования тепло- и массообмена // Свидетельство о государственной регистрации программы № 2013660267 от 30.10.2013.

References

1. Székely V., Tran van Bien Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method. *Solid-State Electronics*, v. 31, № 9, 1988, p. 1363-1368.
2. Rencz M., Székely V. Structure function evaluation of stacked dies. 20th IEEE SEMI-THERM Symposium, 2004.
3. Rencz M., Kollar E., Poppe A., Ress S. Evaluation issues of thermal measurements based on the structure functions – Proceedings of the 9th International Workshop on THERMal INvestigations of ICs and Systems (THERMINIC'03), 24-26 September, 2003.
4. Székely V., Rencz M., Torok S., Ress S. Calculating effective board parameters from transient measurements. *IEEE Tr. On Component and Packing Technology*, v. 24, № 4, 2002, pp. 605-610.
5. Evdokimova N. L., Ejov V. S., Minin V. F. Thermal analysis of semiconductor structures. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2013, № 1, pp. 69-75
6. Ivanov K. A., Zubkov A. M. The program for the three-dimensional modeling of heat and mass transfer. Certificate of state registration № 2013660267 from 30.10.2013.