

Тепловой анализ полупроводниковых структур

Евдокимова Н. Л., Ежов В. С., Минин В. Ф.

Предложена упрощённая методика теплового анализа полупроводниковых приборов по переходной тепловой характеристике. На основе известной теоретической зависимости температуры поверхности кристалла от времени введена аналитическая тепловая структурная функция. Она позволяет аналитически определять свойства материала либо сечение теплового потока. Показана её применимость для анализа диода. Найдены тепловые сопротивления отдельных элементов конструкции. Определены сечения тепловых потоков. Уточнено значение теплопроводности используемого кремния. Проведён сравнительный анализ керамик.

Введение

Тепловое сопротивление полупроводниковых приборов играет важную роль при рассеивании на них большой мощности. Нередко увеличение теплового сопротивления приводит к выходу прибора из строя в результате перегрева. С точки зрения конструктора и при анализе брака важно знать распределение теплового сопротивления по структуре, чтобы понять, как и насколько можно его снизить.

В последние годы нашёл широкое применение метод анализа тепловых сопротивлений полупроводниковых приборов по кривым нагрева и охлаждения с применением тепловой структурной функции, которая была введена в [1]. Далее метод получил развитие в ряде работ [2], [3] и т. д.

Метод даёт возможность анализировать путь теплового потока, определять свойства материалов, по которым идёт тепловой поток [2], а также проверять адекватность тепловых моделей. Он использован для измерения тепловых сопротивлений полупроводниковых приборов в последнем стандарте по тепловым испытаниям JESD51-14 [4]. (Организация JEDEC разработала в 2011 году новый стандарт тестирования тепловых характеристик корпусов на основе технологии T3Ster компании Mentor Graphics [5]).

В основу метода положена обработка экспериментальной зависимости теплового сопротивления полупроводникового прибора от времени $R_t = f(t)$, получаемая при нагреве либо охлаждении прибора, в результате которой находят теплоёмкость прибора C . Тепловые свойства прибора оценивают по зависимости теплоёмкости прибора C от теплового сопротивления R_t . Анализ проводят с помощью дифференциальной тепловой структурной функции K , определяемой через производную полной теплоёмкости прибора по его тепловому сопротивлению $K = dC/dR_t$. По значению тепловой структурной функции K определяют параметры материала и площадь сечения теплового потока. Методика нахождения структурной функции изложена в [3]. Недостатком методики является её сложность. В данной работе предлагается более простая методика теплового анализа по тепловой переходной характеристике с использованием теоретической зависимости температуры поверхности полупроводникового кристалла от времени.

Теория

Рассмотрим один элемент многослойной структуры – кристалл. Через кристалл проходит тепловой поток. В случае, когда задан тепловой поток на одной поверхности и не доходит до границы другой поверхности (граничные условия второго рода), для одномерной задачи температура поверхности имеет вид [6]:

$$T_{\max} = T_0 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{P}{S} \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\lambda c \rho}}, \quad (1)$$

где T_{\max} – температура на нагреваемой поверхности; T_0 – температура холодной поверхности; λ – теплопроводность; c – удельная теплоёмкость; ρ – плотность; P – мощность; S – площадь сечения; t – время.

Выражение для теплового сопротивления (по определению) следующее:

$$R_t = \frac{T_{\max} - T_0}{P}. \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2), получим зависимость теплового сопротивления от времени:

$$R_t = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{S} \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\lambda c \rho}}. \quad (3)$$

Введём поверхностную теплоёмкость элемента C^* , определяемую как количество тепла, необходимое для повышения максимальной температуры структуры, находящейся на поверхности, на один градус (реальная теплоёмкость определяет количество тепла, требуемое для повышения средней по структуре температуры на один градус):

$$C^* = \frac{Q}{(T_{\max} - T_0)} = \frac{Pt}{(T_{\max} - T_0)}, \quad (4)$$

где Q – количество теплоты.

Используя (4) и (2), выразим поверхностную теплоёмкость через тепловое сопротивление:

$$C^* = \frac{t}{R_t}. \quad (5)$$

С учётом (3) получим

$$C^* = \frac{\sqrt{\pi}}{2} S \sqrt{\lambda c \rho} \sqrt{t}. \quad (6)$$

Разделив (6) на (3), получим

$$C^* = \frac{\pi}{4} S^2 \lambda c \rho R_t. \quad (7)$$

Введём аналитическую структурную функцию, продифференцировав поверхностную теплоёмкость C^* , определяемую формулой (5), по тепловому сопротивлению R_t (как сложную функцию):

$$K^* = \frac{dC^*}{dR_t}. \quad (8)$$

При этом получим формулу, по которой аналитическая структурная функция рассчитывается из экспериментальной зависимости $R_t = f(t)$:

$$K^* = \frac{1}{R_t} \frac{dt}{dR_t} - \frac{t}{R_t^2}. \quad (9)$$

С другой стороны, продифференцировав поверхностную теплоёмкость C^* (7) по R_t , получим

$$K^* = \frac{\pi}{4} S^2 \lambda c \rho. \quad (10)$$

Получив функцию K^* по формуле (9), можно определять свойства материалов либо сечение теплового потока по формуле (10). Таким образом, аналитическая структурная функция так же, как и тепловая структурная функция [1], позволяет определять параметры материала либо площади сечения теплового потока, проходящего через элемент конструкции.

Полупроводниковый прибор является многослойной структурой. Основными элементами, по которым идёт тепловой поток, являются кристалл и корпус. Особенностью такой конструкции является то, что тепловая постоянная корпуса более чем на порядок превышает тепловую постоянную кристалла, поэтому, когда нагревается корпус, для кристалла это будет уже статический режим, при котором распределение температуры по толщине кристалла является линейной функцией. При этом приращение температуры на границе кристалл-корпус будет равно приращению температуры на поверхности кристалла, то есть по изменению температуры поверхности кристалла можно анализировать прохождение теплового потока через корпус. Таким образом, использование формул (9) и (10) является оправданным и для анализа теплового переноса через корпус.

В отличие от тепловой структурной функции, введённой в работе [1], аналитическая структурная функция применима не на всех участках тепловой переходной характеристики, а только на участках, где тепло не дошло до конца элемента тепловой модели. При этом теплоёмкость пропорциональна тепловому сопротивлению (7). На зависимости аналитической структурной функции K^* от теплового сопротивления это участки, где производная dK^*/dR_t равна нулю, то есть либо горизонтальные участки, либо экстремумы.

Методика теплового анализа

Основные стадии предлагаемого теплового анализа: снять экспериментально тепловую переходную характеристику $R_t = f(t)$; для сглаживания экспериментальной кривой экстраполировать экспериментальную зависимость $R_t = f(t)$; рассчитать аналитическую структурную функцию по формуле (9); на горизонтальных участках (либо в экстремумах) зависимости $K^* = f(R_t)$ провести расчёт площади теплового потока либо теплофизических параметров элементов структуры по формуле (10).

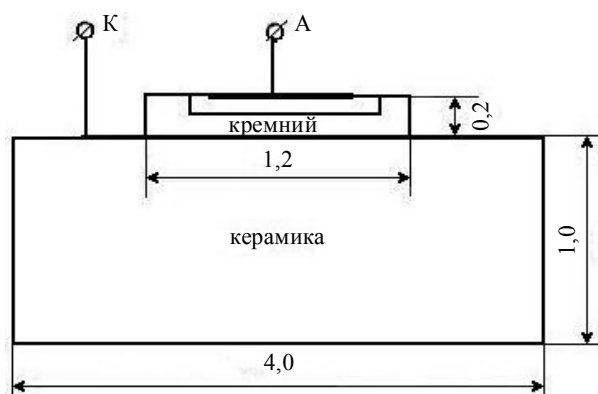


Рис. 1

Конструкция исследуемых приборов

Экспериментальные данные

Примером использования аналитической структурной функции являлся тепловой анализ полупроводниковых диодов.

Исследования проведены на диодах 2Д237, собранных на разной керамике. Конструкция исследуемого прибора приведена на рис. 1.

Половина партии была собрана на бериллиевой керамике, половина на керамике 22ХС. Последовательность действий была следующей. Снималась

тепловая переходная характеристика $R_t = f(t)$ на участке остывания прибора. В качестве термочувствительного параметра использовалось прямое падение напряжения на р-п переходе. В результате были получены два массива значений теплового сопротивления и времени (R_t и t). Полученная экспериментальная зависимость

теплового сопротивления от времени показана красной кривой на рис. 2 (экспериментальные точки отмечены квадратиками).

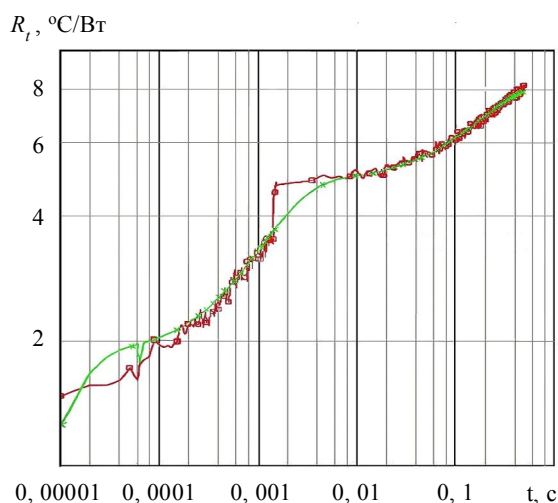


Рис. 2

Тепловая переходная характеристика
(x – аппроксимация; □ – эксперимент)

Далее производилась аналитическая аппроксимация и сглаживание экспериментальной зависимости $R_t = f(t)$ функциями вида:

$$R_t(t) = \sum R_{\tau_i} (1 - \exp(-t/\tau_i)), \quad (11)$$

где i – номер экспоненты.

Аппроксимация проводилась в программе SemiSel [7]. Поскольку аппроксимирующие функции (11) описывают нагрев прибора, а переходной процесс снимался на стадии охлаждения, производился пересчёт кривой охлаждения в кривую нагрева. Для этого для каждого момента времени t_i пересчитывали измеренный элемент массива теплового сопротивления по формуле

$$R_t(t_i)_{\text{нагрев}} = R_t(0) - R_t(t_i)_{\text{остыв}},$$

где $R_t(0)$ – это тепловое сопротивление в начальный момент времени. Для сравнения проводилась аналитическая аппроксимация в программе OriginPro 7.5 функциями $R_t(t) = \sum R_{\tau_i} \exp(-t/\tau_i)$. При этом пересчёта массивов не требовалось. Результаты (коэффициенты разложения) получились близкими.

Затем при использовании полученных значений R_{τ_i} и τ_i производилось аналитическое дифференцирование dR_t/dt и по формуле (9) в программе EXCELL строилась аналитическая структурная функция K^* .

Полученные после аппроксимации в программе SemiSel [7] значения R_{τ_i} , τ_i для приборов, собранных на разной керамике, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты разложения R_{τ_i} , τ_i

	Диод №1 (бериллиевая керамика)	Диод №2 (керамика 22ХС)
R_{τ_1} , °C/Вт	1,84	1,84
τ_1 , с	0,00000914	0,000065
R_{τ_2} , °C/Вт	2,98	2,96
τ_2 , с	0,00151	0,0021
R_{τ_3} , °C/Вт	3,39	7,75
τ_3 , с	0,197	0,157

Тепловой поток проходит сначала через кристалл кремния, а затем через керамику. Кристаллу кремния соответствует тепловое сопротивление $R_{t\ Si} = R_{\tau_1} + R_{\tau_2}$. Первая дополнительная экспонента появляется за счёт того, что начальный участок кривой остывания экстраполируется не

экспоненциальной функцией, а функцией вида \sqrt{t} .

Поэтому кристаллу кремния соответствует суммарное тепловое сопротивление 4,8 °C/Вт. И это значение для обоих диодов одинаково. Тепловое сопротивление бериллиевой керамики составляет 3,39 °C/Вт, а керамики 22ХС более чем в два раза больше – 7,75 °C/Вт. Однако проанализировать сечение теплового потока и свойства материалов только из экспоненциального разложения тепловой переходной характеристики не удаётся. Для этого по формуле (7) найдём аналитическую структурную функцию K^* .

Полученная зависимость аналитической структурной функции от теплового сопротивления для диодов 2Д237, собранных на разной керамике, приведена на рис. 3. Тепловой поток проходит через два элемента: кристалл кремния и керамический корпус.

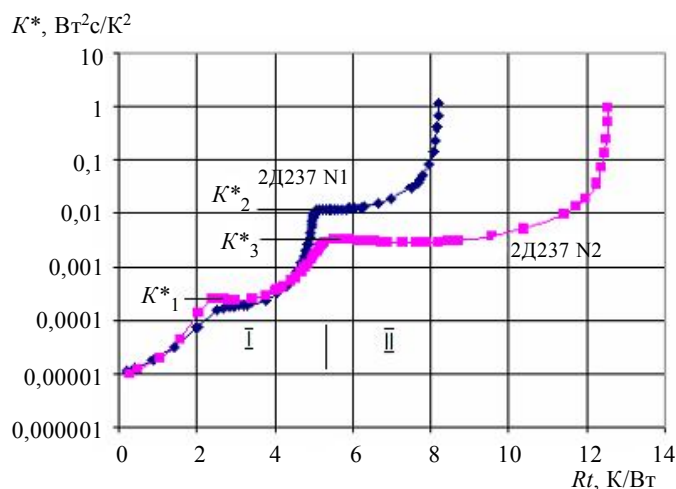


Рис. 3

Аналитическая структурная функция диода 2Д237

Проанализируем путь теплового потока с помощью полученной аналитической структурной функции, используя формулу (10). В табл. 2 приведены значения теплофизических характеристик материалов, используемых в данных диодах.

Рассмотрим рис. 3. На границе элемента тепловое сопротивление должно выходить на насыщение, поэтому аналитическая тепловая структурная функция должна возрасти (где $R_t \rightarrow \text{const}$, там $dC/dR_t \rightarrow \infty$). Воспользуемся этим

условием для разделения элементов. На рис. 3 хорошо видны две зоны, соответствующие прохождению тепла через кристалл кремния (зона I) и через керамический корпус (зона II). Границы зон соответствуют тепловому сопротивлению кремния и керамики и равны значениям,

Таблица 2

Теплофизические характеристики материалов

	λ , Вт/м/град	ρ , кг/м ³	c , Дж/кг/град	$\lambda \cdot \rho \cdot c$, Вт ² с/м ⁴ /град
Кремний	105	2328	759	$1,86 \cdot 10^8$
Бериллиевая керамика [8]	251	2850	1024	$7,33 \cdot 10^8$
Керамика 22ХС[9]	13,4	3650	761	$4,52 \cdot 10^7$

полученным из экспоненциального разложения (табл. 1). Как видно из рисунка, структурная функция выходит на горизонтальный участок, на котором можно провести расчёт пути теплового потока, используя аналитическую структурную функцию. На участке, соответствующем кристаллу (зона I), значение структурной функции обоих приборов одинаково (значение K_1^*). Рассчитаем соответствующую значению K_1^* площадь сечения теплового потока для кремния. Для расчёта были приняты значения тепловых параметров используемых в конструкциях материалов (табл. 2). Приведённые в литературе значения теплопроводности кремния находятся в диапазоне 84-130 Вт/м/град. Выразив площадь S из формулы (10), получим

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{K^*}{\lambda \rho c} \right)^{1/2}. \quad (12)$$

Сопоставление значений площадей теплового потока с площадью кристалла даёт возможность получить значение теплопроводности кремния, используемого в данном приборе. Результаты расчёта даны в табл. 3. Исходя из равенства площадей теплового потока и кристалла было найдено значение теплопроводности кристалла кремния – 105 Вт/м/град.

Сравним диоды, изготовленные на разных керамиках. Поскольку значения аналитической структурной функции для двух приборов на участке кремниевого

кристалла одинаковы (рис. 3), то для обоих приборов площади сечения теплового потока одинаковы. При этом тепловой поток занимает практически всю площадь кристалла. Второй плоский участок и следующий за ним участок возрастания соответствуют прохождению теплового потока через керамику. Оценим площадь теплового потока через керамику. Разделив значения аналитической структурной функции K^* , взятые из графика (рис. 3), на произведение $\lambda_{рс}$ (табл. 2) по формуле (10), получим значения площади теплового потока через бериллиевую керамику диода № 1 и площадь теплового потока через керамику 22ХС диода № 2.

Таблица 3

Сравнительный анализ параметров диода 2Д237, изготовленного на разной керамике

Элемент конструкции	Точка на рис. 2	Значение K^* , Вт ² с/К ²	Расчётная площадь теплового потока, м ²	Реальная площадь, м ²	Rt, °С/Вт
Кристалл кремния	K* ₁	2,52E-4	1,43E-6	(1,2*1,2)E-6	5,0
Бериллиевая керамика (диод № 1)	K* ₂	12,0E-3	4,05E-6	(4*4)E-6	8,2-5,0 = 3,2
Керамика 22ХС (диод № 2)	K* ₃	3,04E-3	9,26E-6	(4*4)E-6	12,5-5,2 = 7,3

Из сопоставления геометрических размеров керамики и площади теплового потока видно, что тепловой поток, проходящий через керамику, занимает не всю площадь керамического корпуса. Тепловое сопротивление керамики 22ХС с учётом площади сечения теплового потока соответствует расчётному значению. Тепловое сопротивление бериллиевой керамики равно 1 °С/Вт. Это меньше значения, приведённого в табл. 3 (3,32 °С/Вт). Возможной причиной может быть меньшее значение теплопроводности используемой в эксперименте керамики.

В табл. 3 приведены значения R_t тепловых сопротивлений элементов конструкции, найденные из границ зон на графике аналитической структурной функции. Они равны значениям R_{ti} , полученным непосредственно из экспоненциального разложения кривой остывания (табл. 1).

Таким образом, использование аналитической структурной функции позволяет определить тепловые сопротивления, площади теплового потока и теплофизические параметры материалов в многослойных конструкциях.

Выводы

1. Предложена упрощённая методика теплового анализа по переходной тепловой характеристике.

2. Тепловой анализ можно проводить с помощью аналитической структурной функции, имеющей вид

$$K^* = \frac{1}{R_t} \frac{dt}{dR_t} - \frac{t}{R_t^2}.$$

3. На горизонтальных участках (либо в экстремумах) графика зависимости аналитической структурной функции K^* от теплового сопротивления по значению K^* можно определять площадь сечения теплового потока S либо теплофизические

параметры (λ , ρ , c) многослойных структур.

4. Тепловые сопротивления отдельных элементов конструкции, найденные с помощью экспоненциального разложения переходной тепловой характеристики и с помощью аналитической структурной функции, совпадают.

5. Проведён поэлементный сравнительный анализ тепловых сопротивлений приборов, изготовленных на разной керамике.

6. Уточнено значение теплопроводности используемого кремния.

7. Определены значения площадей теплового потока для разных элементов конструкции.

Литература

1. V. Székely, Tran van Bien. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method // Solid-State Electronics. – V. 31. – N 9. – 1988. – P. 1363-1368.

2. M. Rencz, V. Szekely. Structure function evaluation of stacked dies // 20th IEEE SEMI-THERM Symposium. – 2004.

3. A. Poppe, G. Farkas, V. Székely et al. Multi-domain Simulation and Measurement of Power LED-s and Power LED Assemblies // 22th IEEE SEMI-THERM Symposium. – 2006.

4. JESD51-14. Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction-to-case of Semiconductor Devices with Heat Flow through a Single Path. – 2011.

5. <http://www.mentor.com/products/mechanical/products/t3ster>. – T3Ster®. – Dynamic Thermal Characterization.

6. А. И. Пехович, В. М. Жидких. Расчёты теплового режима твердых тел // Л.: Энергия. – 1968. – 303 с.

7. <http://www.ntcom.ru/EFoider.html>. Новые технологии. Программа SemiSel 3.1.

8. <http://www.zavodceramica.narod.ru/RUS.html>.

9. <http://www.svetlanajsc.ru/production/detail.php?ID=1104>.

СВЧ МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ																									
производства ОАО «НПП «ПУЛЬСАР»																									
<p>1324ПЦ1 / 1324ПЦ2 / 1324ПЦЗУ СВЧ делители частоты с фиксированным коэффициентом деления</p> 	<p>1324УВ2 / 1324УВ3 СВЧ усилители</p> 																								
<p>1324ПЦ1 (1324ПЦ2, 1324ПЦЗ) - СВЧ МИС широкополосного статического делителя частоты с фиксированным коэффициентом деления 2(4, 8) в диапазоне рабочих частот до 3,8 ГГц, согласованная по входу и выходу с линией с волновым сопротивлением 50 Ом, обладает широким динамическим диапазоном по входу от -10 дБм до +10 дБм. Имеет вход для подачи сигнала отключения питания. СВЧ МИС изготавливается в миниатюрном металлокерамическом корпусе с размерами 5x5 мм² и в виде кристаллов.</p>	<p>1324УВ2 (1324УВ3) - СВЧ МИС широкополосного усилителя с диапазоном рабочих частот до 3,5 ГГц и выходной мощностью до 100 мВт, согласованная по входу и выходу с линией с волновым сопротивлением 50 Ом, обеспечивает возможность изменения тока потребления в широких пределах для получения заданной выходной мощности. СВЧ МИС изготавливается в миниатюрном металлокерамическом корпусе с размерами 5x5 мм² и в виде кристаллов.</p>																								
<p style="text-align: center;">Основные характеристики</p> <table border="0"> <tr> <td>Диапазон рабочих частот</td> <td style="text-align: right;">3,8 ГГц</td> </tr> <tr> <td>Динамический диапазон</td> <td style="text-align: right;">-20...+10 дБм</td> </tr> <tr> <td>Уровень фазовых шумов</td> <td style="text-align: right;">-147 дБ/Гц</td> </tr> <tr> <td>Выходное напряжение</td> <td style="text-align: right;">350 мВ</td> </tr> <tr> <td>Однополярное питание</td> <td style="text-align: right;">+5 В</td> </tr> <tr> <td>Потребляемый ток</td> <td style="text-align: right;">45 мА</td> </tr> <tr> <td>Диапазон рабочих температур</td> <td style="text-align: right;">-60...+85 °С</td> </tr> </table>	Диапазон рабочих частот	3,8 ГГц	Динамический диапазон	-20...+10 дБм	Уровень фазовых шумов	-147 дБ/Гц	Выходное напряжение	350 мВ	Однополярное питание	+5 В	Потребляемый ток	45 мА	Диапазон рабочих температур	-60...+85 °С	<p style="text-align: center;">Основные характеристики</p> <table border="0"> <tr> <td>Диапазон рабочих частот</td> <td style="text-align: right;">3,5 ГГц</td> </tr> <tr> <td>Коэффициент усиления</td> <td style="text-align: right;">21 / 19 дБ</td> </tr> <tr> <td>Коэффициент шума</td> <td style="text-align: right;">2,7 / 2,9 дБ</td> </tr> <tr> <td>Выходная мощность</td> <td style="text-align: right;">100 / 30 мВт</td> </tr> <tr> <td>Диапазон рабочих температур</td> <td style="text-align: right;">-60...+85 °С</td> </tr> </table>	Диапазон рабочих частот	3,5 ГГц	Коэффициент усиления	21 / 19 дБ	Коэффициент шума	2,7 / 2,9 дБ	Выходная мощность	100 / 30 мВт	Диапазон рабочих температур	-60...+85 °С
Диапазон рабочих частот	3,8 ГГц																								
Динамический диапазон	-20...+10 дБм																								
Уровень фазовых шумов	-147 дБ/Гц																								
Выходное напряжение	350 мВ																								
Однополярное питание	+5 В																								
Потребляемый ток	45 мА																								
Диапазон рабочих температур	-60...+85 °С																								
Диапазон рабочих частот	3,5 ГГц																								
Коэффициент усиления	21 / 19 дБ																								
Коэффициент шума	2,7 / 2,9 дБ																								
Выходная мощность	100 / 30 мВт																								
Диапазон рабочих температур	-60...+85 °С																								