

Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов

Несмотря на постоянное повышение энергетической эффективности современной электроники, другой важной тенденцией ее развития является уменьшение габаритов изделий. Происходит как уменьшение размеров всех составляющих электронных компонентов (ЭК), так и внедрение новых технологий более плотного их монтажа. Это приводит к увеличению плотности потоков тепла, повышению локальной и средней температуры и увеличению связанных с этим механических напряжений.

Владимир Вяжиров

cc_d@mail.ru

Сейчас разработчики электроники (не обязательно силовой) все реже оставляют без внимания тепловые процессы, протекающие в их изделиях. Зачастую задача обеспечения необходимых тепловых характеристик (ТХ) оказывается наиболее сложной (например, в условиях вакуума). Для успешного решения этой задачи, кроме расчета ТХ при разработке ЭК, необходим их постоянный контроль на всех этапах производства. Не менее важно обеспечить надежность ЭК, то есть предотвратить существенную деградацию его тепловых и механических свойств во время эксплуатации. По данным [1], 55% случаев отказа в электронных системах связано с перегревом. Стандарт IEEE 1413 (посвященный прогнозированию надежности) признает необходимость контроля ТХ на всех уровнях производства электронной системы. Одним из самых эффективных способов проверки надежности ЭК является испытание на устойчивость к энергоциклам, в процессе которого также предусмотрен контроль ТХ [2].

Потребителям ЭК тоже полезно контролировать свои технологические (особенно сборочные) операции с точки зрения ТХ, в том числе проверять справочные данные, которые предоставляет производитель, и определять технологический разброс ТХ. Иногда продавцы ЭК (в рекламных целях) несколько лукавят, приводя тепловые характеристики ЭК [3].

Казалось бы, необходимость широкого распространения средств измерения ТХ не требует доказательств, однако, к сожалению, потребители (а иногда и производители) ЭК часто не уделяют должного внимания вопросу измерения ТХ, полагаясь на справочные данные или просто проектируя свои изделия «с запасом». Понятно, что такой подход, в лучшем случае, снижает конкурентоспособность изделий. Такая ситуация возникла, в первую очередь, как раз из-за отсутствия доступных средств измерения ТХ. Когда измерения все же проводятся, то они обычно ограничиваются

измерением теплового сопротивления (ТС). Так, в [4] для проверки расчетных данных температуру кристалла измеряли с помощью нанесенной на него термокраски, в [5] для этой же цели использовался инфракрасный микроскоп, а в [6] — измерительный стенд. Во всех случаях измерялась установившаяся температура кристалла, таким образом, ТХ исследуемого прибора представлялись единственной величиной, так называемым статическим ТС. Эта величина позволяет рассчитать температуру кристалла в условиях постоянной мощности, но и только. При переменной мощности этого недостаточно.

Теоретически полной совокупностью ТХ является объемное распределение удельной теплопроводности и удельной теплоемкости всех материалов, составляющих ЭК. На практике для точного моделирования тепловых процессов ТХ представляют в виде математической эквивалентной тепловой модели (ЭТМ) с необходимым количеством элементов, что позволяет рассчитать мгновенные значения температуры во всех точках ЭТМ при любых режимах нагрева. При производстве ЭК важно не только знать численные значения величин, составляющих ЭТМ, но и уметь сопоставить их с конкретными частями изготавливаемого ЭК. Во многих случаях это поможет выявить причины брака или иных технологических проблем.

В последние десятилетия произошли революционные изменения в методах измерения ТХ [7–9]. Новые методы основаны на анализе динамики температурного отклика на импульс нагрева. Динамические методы дают возможность получить гораздо больше информации о ТХ именно в виде ЭТМ. Кроме того, они позволяют «увидеть» пространственное расположение элементов тепловой модели. Большим недостатком (до последнего времени) считался огромный объем математических вычислений, необходимый для их реализации. Но сегодня эффективные математические методы и современная компьютерная

техника делают этот недостаток не столь существенным. В качестве примера коммерческого средства измерения ТХ можно привести измерительный комплекс T3Ster компании Mentor Graphics. Существуют также отдельные коммерческие программы для практической работы с ЭТМ [10].

Прежде чем перейти к описанию экспериментального измерения ТХ, приведем немного теоретических сведений. При работе с ЭТМ широко используется аналогия законов распространения тепла и электричества. Элементы ЭТМ называют тепловыми сопротивлениями (R) и тепловыми конденсаторами, или теплоемкостями (C). Используются схемы и законы теории электрических цепей, а также вводится понятие теплового импеданса (Z), позволяющее описывать зависимость температуры от мощности нагрева во временной и частотной областях.

Существует две основные схемы представления ЭТМ. На рис. 1а приведен пример одномерной модели, содержащей цепочку RC -звеньев. Каждое звено характеризуется парой величин: R_i — тепловое сопротивление и C_i — теплоемкость. Модель такого типа называют схемой Кауэра. Если реальный объект условно разделить на части (например, кристалл, слой припоя, корпус), то с каждым элементом модели можно сопоставить реальную физическую величину. Например, C_1 — это суммарная теплоемкость корпуса, а R_3 — тепловое сопротивление «кристалл — припой». Если требуется учесть еще тепловые свойства теплоотвода, то его ЭТМ просто подсоединяют справа.

Теория цепей позволяет пересчитать схему Кауэра в схему Фостера, показанную на рис. 1б. Эта схема более удобна для вычислений, так как ее полный импеданс равен сумме импедансов звеньев. Каждое звено:

$$Z(t) = \sum_{i=1}^n Z_i(t) = \sum_{i=1}^n R_i \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)\right), \quad \tau_i = R_i C_i \quad (1)$$

характеризуется двумя величинами: R_i — тепловое сопротивление; τ_i — постоянная времени.

Следует иметь в виду, что схема Фостера является математической абстракцией, ее элементы лишены физического смысла. ЭТМ

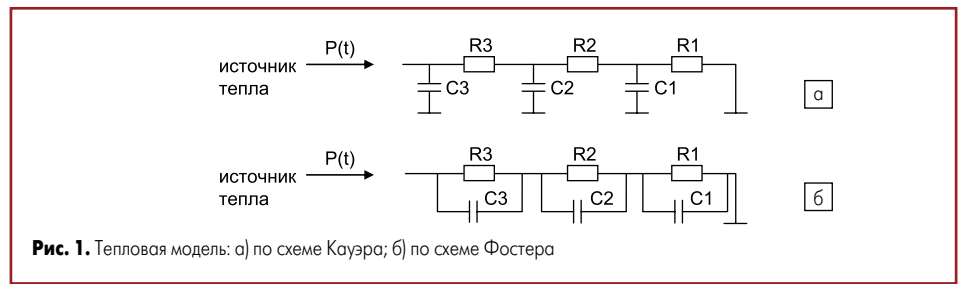


Рис. 1. Тепловая модель: а) по схеме Кауэра; б) по схеме Фостера

в виде схемы Фостера корректно описывает поведение тепловой системы только как единого целого. В отличие от схемы Кауэра удаление или добавление RC -звеньев нельзя сопоставить с удалением или добавлением физических объектов тепловой системы. Если же модификация ЭТМ необходима, то вначале ее нужно преобразовать в схему Кауэра [11].

Рассмотрим несколько полезных функций, которые используются для описания ЭТМ. В большинстве практических случаев для точного расчета температуры достаточно нескольких (не более десяти) RC -звеньев ЭТМ. В таком случае ТМ вида Фостера можно представить таблицей или изобразить дискретным рядом отрезков в системе координат R - τ , как показано на рис. 2а. При бесконечном увеличении размерности модели (практически при числе RC -звеньев более ста) она представляется в виде непрерывной функции $R(\tau)$, называемой спектральной плотностью постоянных времени (рис. 2б).

ЭТМ вида Кауэра с большим количеством звеньев представляется кумулятивной структурной функцией $C_\Sigma(R_\Sigma)$, физический смысл которой легко понять благодаря рис. 3. Еще более интересной является так называемая дифференциальная структурная функция (или просто структурная функция) $S(R_\Sigma)$, представляющая собой производную кумулятивной функции:

$$S(R_\Sigma) = \frac{dC_\Sigma}{dR_\Sigma} = \frac{cAdx}{dx/\lambda A} = c\lambda A^2. \quad (2)$$

Как показано в [12], λ — удельная теплопроводность, c — удельная теплоемкость, а величина A — эффективная площадь сечения канала, по которому распространяется тепло. Именно эта структурная функция (СФ) позволяет «увидеть» внутреннюю структуру тепло-

вой системы. В частности, локальные пики СФ, как правило, соответствуют отдельным слоям разнородных материалов, составляющих тепловую систему, а расстояние между ними по горизонтали показывает вклад каждого слоя в суммарное тепловое сопротивление.

В наиболее простом случае ТХ определяют при анализе реакции измеряемого прибора на ступеньку мощности (то есть включение или выключение нагрева). При этом последовательно выполняются следующие операции:

1. Нагрев испытуемого прибора импульсом постоянной мощности до достижения равновесной температуры во всех слоях тепловой системы, участвующих в переносе тепла.
2. Выключение нагрева и запись зависимости термочувствительного параметра (ТЧП) от времени ТЧП(t) до полного остывания прибора.
3. Преобразование ТЧП(t) в зависимость температуры от времени $T(t)$.
4. Преобразование $T(t)$ по методике, описанной в [8], для получения спектральной плотности постоянных времени $R(\tau)$.
5. Преобразование $R(\tau)$ по методике, описанной в [8], для получения ТМ типа Фостера.
6. Преобразование ТМ типа Фостера в ТМ типа Кауэра [11].
7. Построение СФ [12].

На рис. 4 приведены результаты измерения разных типов полупроводниковых приборов, ЭТМ которых представлены в виде СФ. По горизонтальной оси отложено тепловое сопротивление R_{th} , по вертикальной — $\log(S)$ (формула 2). Все измеряемые приборы монтировались на массивном медном теплоотводе, охлаждаемом водой. Нагрев постоянной мощностью от 5 до 44 Вт производился в течение 10–75 с, затем в течение такого же времени с интервалом 1,6 мкс записывались зна-

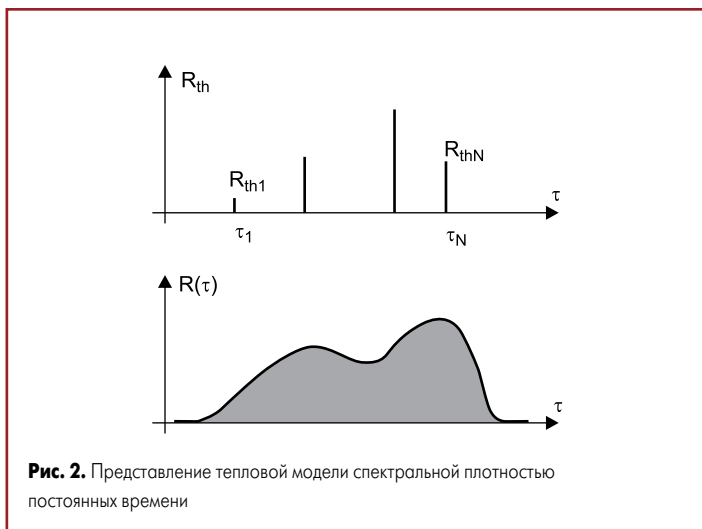


Рис. 2. Представление тепловой модели спектральной плотностью постоянных времени

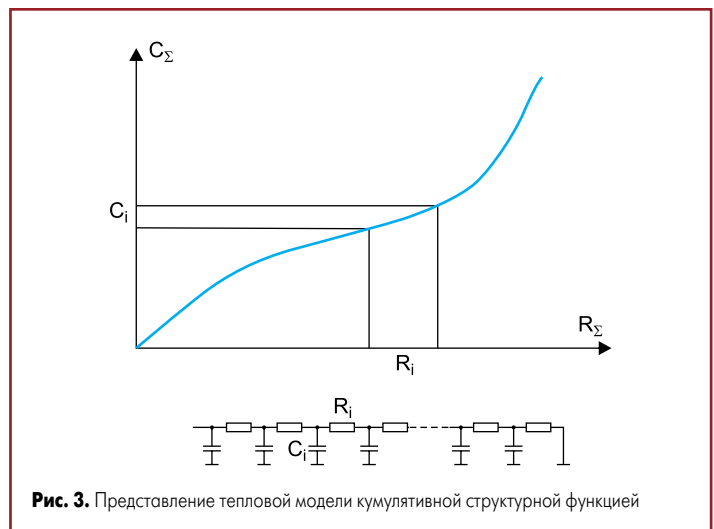


Рис. 3. Представление тепловой модели кумулятивной структурной функцией



Рис. 4. Окно программы с результатами измерений для разных типов полупроводниковых приборов



Рис. 5. Окно программы с примерами СФ двух транзисторных сборок

чения величины ТЧП остывающего прибора. Подробнее о ТЧП и его связи с температурой кристалла сказано в [5, 13, 14].

Измерения проводились с помощью измерителя-анализатора вольт-амперных характеристик Л2-108. В [13] уже описывалось его применение для измерения теплового сопротивления. Тогда речь шла о тепловом сопротивлении, измеренном при различной длительности импульса нагрева. Эти измерения полезны для сравнения приборов друг с другом или в качестве производственного контроля, однако получить на их основе ЭТМ было нельзя. В настоящее время программное обеспечение Л2-108 доработано с целью получения ЭТМ разных форматов (в том числе и СФ) для ряда полупроводниковых приборов (биполярные и МОП-транзисторы, полевые транзисторы с *p-n*-переходом (или барьером Шоттки), диоды).

Нужно сказать, что интерпретация полученных СФ является непростой задачей. Кроме подробного знания внутреннего устройства анализируемой тепловой системы, необходимо иметь представление о возможных источниках аппаратных и расчетных погрешностей. Видимо, для каждого конкретного прибора следует установить свои режимы измерения и свою оптимальную степень детализации СФ. Вопрос о том, являются ли небольшие бугорки на СФ отражением внутренней структуры или они возникают из-за погрешностей, требует дополнительных исследований. Что же касается сравнительно крупных особенностей СФ, то их интерпретация, как правило, затруднений не вызывает.

Для примера рассмотрим СФ двух транзисторных сборок (рис. 5). В них кристаллы КП798Г-А вмонтированы в корпус ТО-220. Кристаллы изолированы от корпуса слоем теплопроводящей керамики. Каждый прибор представлен двумя СФ, полученными в одинаковых условиях, что позволяет оценить погрешность воспроизводимости измерений. Почти горизонтальный участок СФ соответствует переходу от корпуса ТО-220 к теплоотводу. Этот факт подтвержден экспериментально установкой дополнительной прокладки, что

привело к удлинению этого участка, при малом влиянии на другие части СФ (рис. 4). Форма СФ справа от горизонтального участка определяется свойствами теплоотвода, а слева — свойствами внутренних слоев прибора. Согласно (2) к снижению величины *S* может привести снижение величин λ , *c* или A^2 . Маловероятно, чтобы в этом приборе были по ошибке применены материалы с иными теплофизическими свойствами, а вот образование пустот или уменьшение площади контакта между слоями (и, как следствие, уменьшение A^2) вполне возможно. Хорошо объяснимо и расширение (хотя и в меньшей степени) следующих слоев. Так как толщина слоев в этом приборе гораздо меньше их поперечных размеров, то уменьшение площади сечения канала распространения тепла даже в одном слое приводит к растеканию тепла вдоль слоя и увеличению теплового сопротивления.

Выводы

Математическая эквивалентная тепловая модель, представленная в разных форматах, является одной из важнейших характеристик электронного компонента.

Использование современных подходов при измерении тепловых характеристик электронных компонентов позволяет улучшить их качество и надежность, а также решать важные технологические задачи в процессе производства.

Литература

- Zhang M., Jovanovic M., Lee F. C. Design Consideration and Performance Evaluations of Synchronous Rectification in Flyback Converters // IEEE APEC, 1997.
- МЭК 88-2-2-74 (ГОСТ 28200-89) 747-11, ГОСТ 20.57.406-81, ОСТ 11 0730В-83.
- Лоо Д. В. Тепловое сопротивление выпрямителей: трюки маркетологов и истинное положение // Электротехнический рынок. 2009. № 1.

- Нечпатов Ю. Тепловой расчет СИТ-транзисторов и узлов силовых модулей с их применением. Ч. 2 // Силовая электроника. 2010. № 3.
- Canali C., Chiussi F., Donzelli G., et al. Correlation between thermal resistance, channel temperature, infrared thermal maps and failure mechanisms in low power MESFET devices // Microelectronics Reliability. 1989. No. 29 (2).
- Зенин В., Хишко О. Влияние марки припоя и способов пайки кристаллов на характеристики силовых полупроводниковых приборов на примере транзистора КП767В // Компоненты и технологии. 2009. № 8.
- Siegal B. S. Measuring Thermal Resistance Is the Key to a Cool Semiconductor // Electronics. 1978. Vol. 51.
- Szekely V., Bien, T. V. Fine Structure of Heat Flow Path in Semiconductor Devices: A Measurement and Identification Method//Solid-State Electronics. 1988. Vol. 31.
- Sofia J. W. Analysis of Thermal Transient Data with Synthesized Dynamic Models for Semiconductor Devices // IEEE Transactions on Component Packaging & Manufacturing. 1995. Vol. 18. No. 1.
- Колпаков А. И. Расчет тепловых режимов MOSFET-транзисторов с помощью программы HEXRISE // Компоненты и технологии. 2002. № 5.
- Gerstenmaier Y. C., Kiffe W., Wachutka G. Combination of thermal subsystems modeled by rapid circuit transformation/13th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC). Budapest, Hungary. Sept. 17–19, 2007.
- Rencz M., Szekely V. Structure function evaluation of stacked dies Proc. of SEMI-THERM XX, San Jose, CA, USA. March 2003.
- Вяхирев В., Духновский М., Федоров Ю. и др. Измерение теплового сопротивления СВЧ-транзисторов // Современная электроника. 2012. № 2.
- ОСТ 11. 073.82. Методы контроля температуры транзисторной структуры.