



# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОПЛОТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ 3D-МОДУЛЕЙ ИУС

## INVESTIGATING HIGH-DENSITY ELECTRONIC 3D MODULES THERMAL CHARACTERISTICS FOR INFORMATION-CONTROL SYSTEMS

УДК 621.384(063)

ХОХЛОВ МИХАИЛ ВАЛЕНТИНОВИЧ

KHOKHLOV MIKHAIL V.

АО «НИИ технологии и автоматизации производства»  
*khokhlov@niitap.ru*

“Research Institute of Technology and Production Automation” JSC  
*khokhlov@niitap.ru*

Трехмерная интеграция кристаллов БИС обостряет задачу учета теплораспределения в устройствах типа «Система в корпусе». В данной работе рассмотрено применение метода тепловых сопротивлений для экспериментального определения тепловых параметров многоуровневых конструкций 3-D МКМ и оценки перегрева кристаллов БИС при их монтаже в конструкции этажерочного типа.

**Ключевые слова:** многокристальный модуль; система в корпусе; тепловое сопротивление.

Three-dimensional integration of LSI crystals aggravates the problem of accounting for heat distribution in devices such as “System in a casing”. In this paper, we consider the application of the thermal resistance method for the experimental determination of thermal parameters of multilevel structures of 3D MCM and the evaluation of the overheating of LSI crystals when they are mounted in a stacked structure.

**Keywords:** multi-chip module; “system in package”; thermal resistance.

Увеличение функциональной насыщенности современных информационно-управляющих систем (ИУС) сопровождается снижением массо-габаритных показателей и ростом плотности упаковки элементов. При этом с увеличением плотности компоновки электронных модулей обостряется проблема отвода тепла. При высокой плотности размещения кристаллов БИС возможна ситуация разогрева кристалла микросхемы за счет тепла, выделяемого соседним кристаллом, рассеивающим большую мощность. Это может привести к локальным перегревам, ускорению деградационных процессов и снижению надежности электронных устройств. Поэтому появление новых классов высокоплотных электронных устройств, таких как многокристальные модули (МКМ) и система в корпусе (СвК), требует более детального анализа тепловых процессов.

Одним из методов описания тепловых процессов в интегральных микросхемах и полупроводниковых приборах является использование модели теплового сопротивления. Тепловое сопротивление характеризует отклик конструкции в виде повышения температуры кристалла на некоторую выделяющуюся мощность в установленном режиме:

$$R_T = \frac{\Delta T}{P}$$

где  $R_T$  — тепловое сопротивление,  $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ;  $\Delta T$  — повышение температуры кристалла,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $P$  — электрическая мощность, рассеиваемая кристаллом,  $\text{Вт}$ .

Данная модель довольно хорошо и широко используется для определения безопасных режимов работы БИС и полупроводниковых приборов в целях предотвращения перегрева кристаллов. Вместе с тем разработка новых конструкций, в частности таких, как трехмерные (3D) МКМ, требует дальнейшего развития методик и применения указанных методов.

АО «НИИТАП» в течение ряда лет ведет разработки конструкции и технологии изготовления модулей СОЗУ для применения в ИУС, в которых кристаллы БИС смонтированы в трехмерную конструкцию, представляющую собой этажерку с количеством этажей 2 или 4. Пример реализации такого узла приведен на рис. 1. Очевидно, что для такого рода конструкций необходим углубленный анализ тепловых процессов, протекающих в функционирующих устройствах.

В качестве объекта для исследований была выбрана конструкция четырехъярусной этажерки кристаллов БИС, смонтированных на кремниевую коммутационную плату (ККП), которую поместили в металлокерамический корпус. Для проведения исследований был разработан специальный тестовый кристалл, содержащий шину металла, выполняющую роль резистивного тепловыделяющего элемента, и набор интегральных диодов — термочувствительных элементов, распределенных по площади тестового кристалла и имеющих независимые выводы на внешние контактные площадки.

Исследования проводились в соответствии с методом измерения теплового сопротивления микросхем с контролем температуры кристалла по термочувствительному параметру (метод 8.3 ОСТ II 0944-96). Эквивалентная тепловая схема исследуемой конструкции приведена на рис. 2.

При построении тепловой модели были сделаны следующие приближения:

- одномерный характер распространения тепла (суммарная толщина структуры  $\sim 2,5$  мм, что существенно меньше размеров кристалла в этажерке);
- тепловое сопротивление между ярусами в этажерке определяется свойствами клеевого слоя (теплопроводность кремния — 150, клея —  $0,4 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ );
- теплоперенос по выводам кристаллов отсутствует.

Модель учитывает следующие тепловые сопротивления:

$R_a, R_b, R_c, R_d$  — кристалл — кристалл в этажерке;

$R_2$  — верхний кристалл этажерки — корпус МКМ;

$R_4$  — ККП — основание корпуса МКМ;

$R_5$  — основание корпуса — окружающая среда.

Если использовать тепловое сопротивление как аналог резистора в эквивалентной тепловой схеме, представленной на рис. 2, то подача электрической мощности на конкретный ярус этажерки эквивалента заданию определенного тока в соответствующий узел схемы, а температура элемента конструкции эквивалентна электрическому потенциалу узла схемы. Таким образом, была рассчитана температура каждого яруса этажерки, ККП и основания корпуса при подаче фиксированной электрической мощности на определенный ярус этажерочной конструкции. Для выбранной эквивалентной электрической схемы была выведена система расчетных выражений.

Как показали расчеты, самым «горячим» являлся тот ярус этажерки, на котором находился источник тепла. Понижение температуры этажер, расположенных ниже нагревателя, характеризовалось определенным «градиентом», отличным от падения температуры верхних этажер, что объясняется разными значениями суммарного теплового сопротивления для «нисходящего» и «восходящего» тепловых потоков. Кроме того, как и ожидалось, в наихудших условиях по теплоотводу находился верхний кристалл. Абсолютная величина перегрева минимальна для самого нижнего кристалла вследствие его близости к теплоотводу.

Однако для количественной оценки тепловых условий трехмерной конструкции необходимо задание конкретных значений тепловых сопротивлений, в нашем случае  $R_0, R_2, R_4, R_5$ , что, как правило, связано с трудностями их экспериментального измерения или расчета. Поэтому нами была решена обратная задача: по результатам экспериментальных измерений температуры элементов конструкции рассчитать значения тепловых сопротивлений.

Для определения параметров системы уравнений проведены изменения температуры кристаллов этажерки при различных уровнях подводимой мощности к каждому ярусу этажерки.

Отметим, при определении  $R_T$  мы имеем некоторую избыточность: 7 неизвестных в системе из 16 уравнений. Однако аналитическое решение этой системы уравнений не представилось возможным. Поэтому для определения параметров эквивалентной схемы был выбран подход оптимизации величин  $R_a, R_b, R_c, R_d, R_2, R_4, R_5$  для поиска минимума целевой функции — суммарной ошибки между расчетными и экспериментально определенными значениями температуры. Ошибка определялась как модуль разности расчетных и экспериментальных значений. Результаты расчета следующие:  $R_a = 3,1, R_b = 4,9, R_c = 2,9, R_d = 3,6, R_2 = 38,2, R_4 = 6,3, R_5 = 0,1^\circ\text{C}/\text{Вт}$ . Легко видеть, что расхождения между  $R_a, R_b, R_c$  и  $R_d$  значительны и составляют 30%, что может быть связано с неравномерностью толщины kleевого шва.

На рис. 3 приведены рассчитанные и экспериментально измеренные значения температуры кристаллов. Видно, что расхождения экспериментальных и расчетных значений температуры не превышают 1°C, что свидетельствует об удовлетворительном совпадении моделирования и эксперимента.

Сравнение температурных данных, полученных от разных термочувствительных элементов, расположенных на одном кристалле, показало, что температура кристалла однородна (в пределах погрешности измерений). Это свидетельствует, во-первых, о том, что выбранная одномерная модель теплопереноса

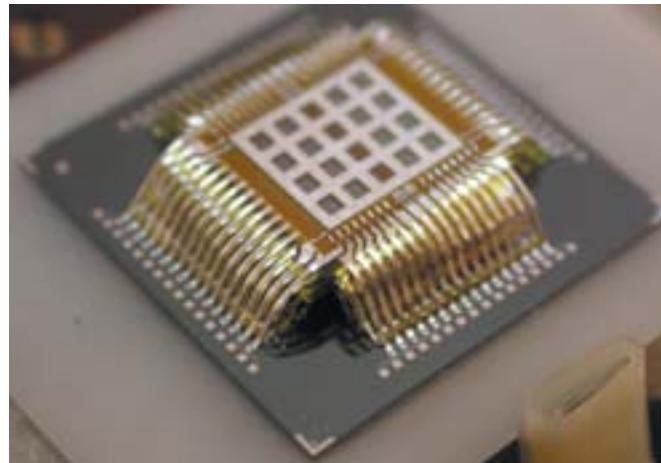


Рис. 1. Исследуемый образец

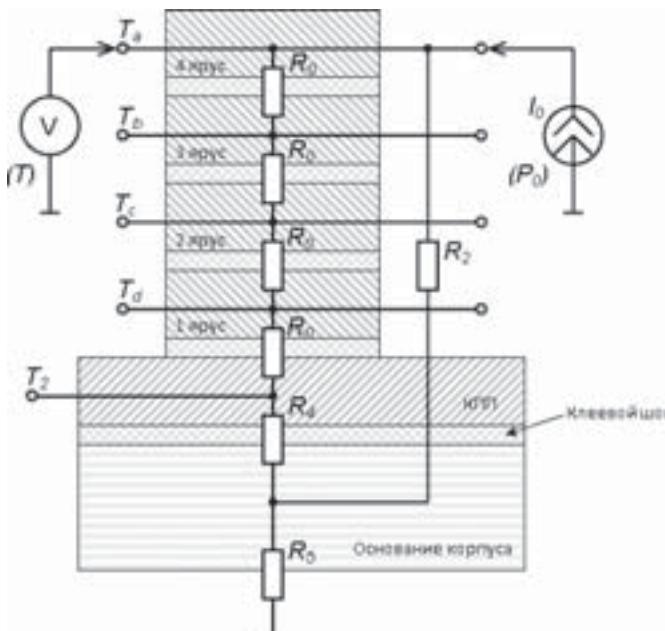


Рис. 2. Эквивалентная тепловая схема МКМ

корректна, а во-вторых, что неоднородность толщины слоя клея мала и не оказывает существенного влияния на распределение температуры. Поэтому в дальнейшем учитывалась только разнотолщинность слоя клея между разными ярусами этажерки. Для этого случая эквивалентная тепловая схема этажерочной конструкции была изменена, были введены  $R_a, R_b, R_c, R_d$  — тепловые сопротивления kleевых швов для 4, 3, 2 и 1 ярусов этажерки соответственно. Как и в предыдущем случае, была рассчитана температура кристаллов каждого из ярусов этажерки в зависимости от того, к какому из кристаллов подведена рассеиваемая мощность.

- Полученные данные теплового сопротивления кристалл — кристалл в этажерке, кристалл — ККП и ККП — основание корпуса могут быть использованы как параметры при тепловом моделировании аналогичных трехмерных конструкций МКМ.

Вместе с тем представляется возможным использовать полученные результаты при проектировании более сложных конструкций, например, содержащих несколько тепловыделяющих

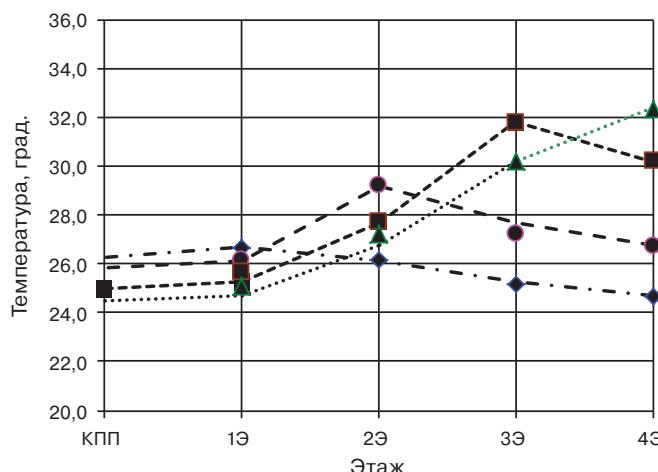


Рис. 3. Результаты расчета распределения температуры по ярусам этажерки в зависимости от расположения теплорассеивающего кристалла

элементов на ККП в планарном исполнении. В этом случае выделение тепла в одной этажерке будет подогревать плату и затруднить теплоотвод от соседней этажерки, расположенной по соседству на этой же плате. Однако в этом случае задача имеет существенно двумерный характер и при расчете тепловых полей необходимо учитывать растекание тепла по плоскости ККП.

Другое применение разработанной модели — оценка тепловых режимов 3D МКМ с большим количеством ярусов в этажерке, например, восьми. Тогда предположим, что тепловые сопротивления между кристаллами в этажерке одинаковы и составляют величину  $4^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ . Проведенные расчеты показали,

что тепловые условия для всех кристаллов оказываются хуже, чем для случая четырехъярусной этажерки. При этом самым нагреваемым кристаллом оказался кристалл, расположенный на шестом ярусе, и его максимальная температура превышает на  $25^{\circ}\text{C}$  температуру самого горячего кристалла в четырехъярусной этажерке. Максимальный нагрев шестого (не самого верхнего) яруса этажерки свидетельствует о том, что этот кристалл находится в самых худших условиях теплоотвода: с одной стороны, от основания корпуса его отделяет стопа из пяти кристаллов (тепловое сопротивление которых суммируется), с другой стороны, восходящий тепловой поток также должен преодолеть  $R_t$  двух верхних ярусов и теплоотдачу от верхнего кристалла корпусу МКМ. Таким образом, положение самого нагревшего элемента конструкции зависит от соотношения тепловых сопротивлений нисходящего и восходящего тепловых потоков и, в свою очередь, определяется соотношением тепловых сопротивлений конкретных элементов конструкции. Разработанная модель позволяет определять тепловые сопротивления между кристаллами, расположенными на соседних ярусах этажерки; тепловое сопротивление кристалл — кристалл при использовании клея типа СИЭЛ составляет величину  $\sim 4^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$  и обеспечивает перегрев самого горячего кристалла восьмиярусной этажерки на  $25^{\circ}\text{C}$  относительно основания корпуса при рассеиваемой мощности 1 Вт.

Автор считает, что новым в данной работе является применение расчета тепловых сопротивлений к достаточно сложным 3D-конструкциям высокоплотных электронных модулей как для экспериментального определения параметров, используемых для дальнейшего теплового моделирования таких структур, так и для оценки перегрева кристаллов при проектировании конструкций с многоуровневой интеграцией кристаллов БИС.

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 840 руб.

### НАНО-КМОП-СХЕМЫ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ НА ФИЗИЧЕСКОМ УРОВНЕ

Б.П. Вонг, А. Миттал, Ю. Цао, Г.В. Стэрр  
При поддержке ООО «ТехноСтарт»  
Перевод с англ. под ред. д.т.н. Н.А. Шелепина

М: ТЕХНОСФЕРА, 2013. – 432 с.  
ISBN 978-5-94836-377-6

Книга содержит весьма актуальные сведения по особенностям современных технологий СБИС уровня 130–90 нм, которые необходимо знать и учитывать при проектировании. Эти сведения изложены в первом разделе (главы 1–3). Во втором разделе (главы 4–9) описаны соответствующие приемы проектирования на физическом уровне для схем смешанного сигнала и аналоговых компонентов, схем памяти, методов снижения потребляемой мощности, схем ввода/вывода и защиты от электростатического разряда, целостности сигнала с учетом длинных межсоединений. В третьем разделе (главы 10–11) рассмотрены приемы проектирования, обеспечивающие повышение выхода годных и учет вариаций технологического процесса.

Следует заметить, что до появления этой книги системного и собранного в одну книгу пособия для разработчиков современных СБИС на транзисторном уровне просто не было.

Книга будет весьма полезна не только конструкторам, но и инженерам-технологам, осуществляющим разработку новых технологий и соответствующих правил проектирования.

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; ☎ +7 (495) 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru