

Конструктивная прочность и тепловой режим многокристалльных модулей

А.И. Погалов, Г.А. Блинов, Е.Ю. Чугунов

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва,
Россия*

Structural Strength and Thermal Behavior of Multichip Modules

A.I. Pogalov, G.A. Blinov, E.Y. Chugunov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

Изложены общие принципы проектирования многокристалльных модулей в трехмерном исполнении. Проведено моделирование многокристалльных модулей и исследовано влияние конструктивных параметров на прочность и тепловой режим изделий. Определены величины термомеханических напряжений, тепловых сопротивлений и температур перегрева материалов, а также установлена эффективность теплоотвода в различных конструктивных исполнениях трехмерных модулей. Разработаны способы обеспечения интенсивной теплопередачи в конструкциях модулей и повышения прочностной надежности изделий. Даны рекомендации по проектированию многокристалльных модулей.

Ключевые слова: многокристалльный модуль; конструктивная прочность изделий; тепловой режим трехмерных модулей; напряженно-деформированное состояние материалов; метод конечных элементов.

The general principles of design of the three-dimensional multichip modules have been presented. The modeling of the multichip modules has been performed and the influence of the structural parameters on the strength and on the thermal behavior of the products has been determined. The values of the thermomechanical stresses, heat resistance and temperatures of overheating of the materials have been determined. The efficiency of heat removal in various designs of three-dimensional modules has been established. The methods to provide the intense heat in the constructions of the modules and the high strength product reliability have been developed. The recommendations for designing the multichip modules have been given.

Keywords: multichip module; structural strength of products; thermal behavior of the three-dimensional modules; stress-strain state of materials; finite-element method.

Введение. Основными требованиями к конструкции современных микроэлектронных приборов являются повышение функциональной сложности, снижение массогабаритных характеристик изделий, увеличение их надежности и конструктивной прочности. Одно из перспективных направлений микроэлектроники, обеспечивающее выполнение этих требований, – разработка многокристалльных модулей (МКМ) в трехмерном исполнении [1, 2].

Существуют различные конструктивно-технологические способы изготовления трехмерных МКМ с высокой степенью интеграции. В настоящей работе рассматривается способ, основанный на принципах сверхплотного монтажа многовыводных микросхем в бескорпусном исполнении на полиимидные коммутационные платы и объемной сборки трехмерных МКМ стапелированием кристаллов один над другим с фиксацией клеевыми герметизирующими материалами. Монтаж изготовленных трехмерных МКМ, как правило, производится на диэлектрические или металлодиэлектрические основания, которые выполняют также функцию теплоотвода [3].

Конструкции модулей. Современный подход к проектированию многослойных композиционных конструкций, таких как трехмерные МКМ, требует применения численных методов, основанных на дискретной обработке данных, и компьютерно-интегрированного моделирования. В проводимых исследованиях используется программно-вычислительный комплекс, который основан на методе конечных элементов и применяется для расчетов и моделирования сложных конструкций [1, 4, 5].

С целью обоснованного выбора конструктивных параметров и анализа их влияния на механическую прочность и надежность конструкций МКМ определены тепловой режим модулей, напряженно-деформированное состояние (НДС) материалов и проведена оценка эффективности разработанных конструктивных вариантов отвода тепла, выделяемого кристаллами. Для этого разработаны девять вариантов модели трехмерного МКМ с конечно-элементной дискретизацией, различающихся по конструктивным

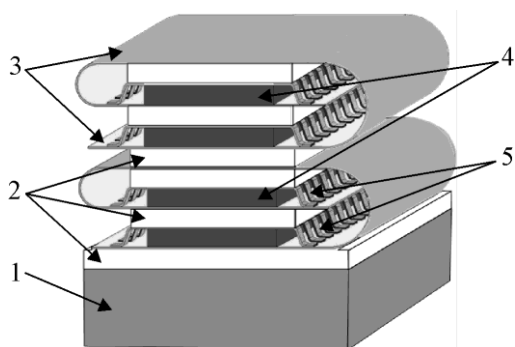


Рис.1. Конструкция четырехкристального модуля в трехмерном исполнении: 1 – основание из АМг сплава; 2 – теплопроводящий клей; 3 – полиимидная плата; 4 – кремниевый кристалл; 5 – алюминиевые выводы

параметрам и сочетанию материалов. Конструкция четырехкристального модуля в трехмерном исполнении показана на рис.1. Геометрические размеры моделей 10×10 мм в плане. Физико-механические и теплофизические свойства используемых материалов приведены в табл.1 [1, 2, 4, 6]. Тепловые эффекты внутри каждого МКМ характеризуются мощностью тепловыделения 10 Вт. Полученные в результате моделирования МКМ значения максимальной температуры в материале T_{\max} , напряжения в центре слоя материала σ , максимального напряжения σ_{\max} для четырех вариантов модели представлены в табл.2.

Таблица 1

Физико-механические и теплофизические свойства материалов МКМ

Материал	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона μ	ТКЛР α , 10^6 , $^{\circ}\text{C}^{-1}$	Допускаемые напряжения $[\sigma]$, МПа	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Теплоемкость C , Дж/(кг·К)
Сплав АМг	$7 \cdot 10^4$	0,33	24	200	180	900
Кремний	$1,3 \cdot 10^5$	0,3	4,2	200	100	650
Медь	$1,2 \cdot 10^5$	0,35	16,5	100	300	370
Алюминий	$7 \cdot 10^4$	0,33	22	150	240	860
Клей-герметик	2	0,4	230	3	1,8	400
Полиимид	$3 \cdot 10^3$	0,3	20	175	0,3	1140
Алмаз	$5 \cdot 10^5$	0,3	1,0	500	1500	-

Таблица 2

Результаты моделирования МКМ для четырех вариантов моделей

Материал МКМ	Толщина слоя, мкм	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3			Вариант 4		
		$T_{max}, ^\circ C$	$\sigma, \text{МПа}$	$\sigma_{max}, \text{МПа}$	$T_{max}, ^\circ C$	$\sigma, \text{МПа}$	$\sigma_{max}, \text{МПа}$	$T_{max}, ^\circ C$	$\sigma, \text{МПа}$	$\sigma_{max}, \text{МПа}$	$T_{max}, ^\circ C$	$\sigma, \text{МПа}$	$\sigma_{max}, \text{МПа}$
Основание	1000	21	3,0	5,3	22	12	14,9	21,9	2,1	3,4	21	3,5	16,7
Полиимид	50	50	1,2	2,9	55,6	5,1	6,8	32,4	0,2	2	52,4	1,7	2,7
Клей	50	55	0,2	0,4	94	0,3	1,0	42,7	0,1	0,3	57,6	0,1	0,5
Полиимид	50	85	1,0	6,0	133	7	13,5	53	0,7	4,1	89	3,4	6,4
Кремний	300	85,2	25	86	167	37	196	53,8	9,1	55,7	89,3	16	85,6
Алюминий	30	85,2	55	128	168	250	289	53,9	22	89,4	89,4	118	141
Клей	50	87,3	0,1	0,2	172	0,3	0,7	59	0,05	0,1	91,8	0,1	0,3
Полиимид	50	100,1	5	8,6	201	12	21	64,1	0,2	6,0	106,5	5,3	9,3
Кремний	300	100,2	20	106	226	56	274	64,4	14,4	69	106,5	22	106
Алюминий	30	100,2	67	157	227	360	405	64,4	72	110	106,6	146	175
Клей	50	99,5	0,05	0,1	229	0,1	0,5	64	0,05	0,1	106,3	0,1	0,2
Полиимид	50	95,6	5,4	9,0	249	17	26,5	63,6	0,9	6,4	104,5	6	10
Кремний	300	95,4	20	100	266	66	326	63,3	14	66	104,3	22,6	103
Алюминий	30	95,4	63	149	266	411	482	63,3	70	106	104,3	140	170
Клей	50	92	0,1	0,2	266	0,1	0,3	57,7	0,1	0,2	101,3	0,05	0,1
Полиимид	50	71,4	4,4	7,2	269	17,2	30	52,1	1,4	5,2	83,2	5,1	8,4
Кремний	300	71	14,7	67,5	286	68	351	51,3	11	46	82,9	18	90
Алюминий	30	71	84	99,4	286	450	522	51,1	50	74	82,7	103	120
Клей	50	64,7	0,1	0,2	286	0,5	1,2	41,5	0,1	0,2	77,3	0,1	0,2
Полиимид	50	27,4	0,9	2,7	286	3,6	4,3	31,4	0,8	2,4	44,6	1,2	2,5
Клей	50	21,2	0,1	0,2	286	0,05	0,1	21,9	0,1	0,2	39,1	0,1	0,2
Крышка	1000	21	2,4	3,3	286	14	14,2	21,8	2,2	2,7	38,9	5	14

Моделирование теплового режима и прочности МКМ. При моделировании эффектов теплопередачи в материалах модулей перенос тепла обеспечивается теплопроводностью (кондуктивным теплообменом). Предполагается также полная определенность закрепления, геометрических размеров, формы и свойств конструкционных материалов.

В базовом варианте 1 сток тепла от кристаллов модуля осуществляется на основание и крышку, которые изготовлены из алюминий-магниевого (АМг) сплава. Температура основания и крышки постоянна и равна 20 °С. Согласно результатам исследований тепловой режим и НДС материалов МКМ при нагреве определяются толщиной и теплофизическими свойствами материалов. Так, полное тепловое сопротивление R_T всей конструкции модуля, включающей 22 слоя разнородных материалов, составляет 4 К/Вт. При этом тепловое сопротивление полиимида толщиной 50 мкм равно 1,66 К/Вт, что в 55 раз превышает сопротивление кремния толщиной 300 мкм (0,03 К/Вт). Вследствие этого наибольшая температура перегрева в модуле (80,2 °С) достигается в материалах, расположенных в центре многослойной конструкции, и сток тепла от которых блокирован полиимидом. В этих же материалах в результате температурных деформаций возникают максимальные напряжения: в кремниевом кристалле напряжение достигает 106 МПа, в алюминиевых выводах кристалла напряжения возрастают до 157 МПа при температуре нагрева 100,2 °С.

Проведенные ранее исследования показали, что введение в конструкцию МКМ даже одного дополнительного слоя полиимида обуславливает повышение температуры нагрева материалов до 17 °С и увеличение максимальных напряжений до 40 % [5, 7, 8]. Введение дополнительного клеевого слоя характеризуется повышением температуры нагрева материалов не более чем на 3 °С и увеличением максимальных напряжений на 4–5 %. Замена охлаждаемой крышки на радиатор с пассивным охлаждением из АМг сплава при постоянной температуре основания 20 °С повышает максимальную температуру нагрева материалов почти в 3 раза (с 100,2 до 286 °С) и значительно увеличивает максимальные напряжения, превышающие в некоторых материалах допустимые значения (вариант 2). Полное тепловое сопротивление конструкции модуля повышается до 6,7 К/Вт.

Формирование в слоях полиимида сквозных окон 5×5 мм, заполненных клеевым материалом (вариант 3), позволяет уменьшить максимальную температуру перегрева материалов модуля с 80,2 до 44,4 °С и снизить максимальные напряжения в кремнии с 106 до 69 МПа, в алюминии – с 157 до 110 МПа. При этом полное тепловое сопротивление конструкции модуля уменьшается до 2,2 К/Вт. Применение корпуса для сборки и монтажа МКМ (вариант 4) показывает достаточную эффективность для стока тепла от кристаллов по сравнению с вариантом 2. В исследуемой модели основание и крышка из АМг сплава соединены по периметру стенками из того же материала толщиной 1 мм с воздушными зазорами 0,5 мм между стенками и модулем. Установлено, что наибольшая температура нагрева материалов составляет 106,6 °С (температура перегрева кристалла 86,6 °С), максимальные напряжения в кремниевом кристалле не превышают 106 МПа, в алюминиевых выводах кристалла – 175 МПа. Полное тепловое сопротивление конструкции модуля уменьшается до 2,8 К/Вт.

При замене в варианте 1 основания из АМг сплава на алмазное толщиной 1 мм коэффициент теплопроводности основания увеличивается в 8,3 раза (с 180 до 1500 Вт/(м·К)) и, соответственно, уменьшается его тепловое сопротивление с 0,055 до 0,0067 К/Вт. Однако это не обеспечивает пропорционального снижения температуры и напряжений в материа-

лах модуля. Снижение максимальных температур и напряжений по сравнению с базовым вариантом составляет не более 1 %.

В результате проведенных исследований НДС материалов в изученных конструкциях модулей установлено, что распределение напряжений в основании имеет вид одномодовой выпуклой кривой с максимумом в центре. Эпюра напряжений в остальных материалах модуля имеет вид двухмодовой вогнутой кривой с максимумом на краях соединений. Это может оказывать существенное влияние на конструктивную прочность МКМ вследствие температурных напряжений и возникновения деформаций, особенно в местах сопряжения разнородных материалов. При напряжениях и деформациях, близких к пределу упругости материалов, в них могут возникать пластические деформации, а в случае напряжений, близких к пределу прочности материалов, в них могут образовываться трещины, что приводит к нарушению целостности конструкций модулей.

Способы эффективного теплоотвода. Для улучшения передачи тепла от теплонагруженных кристаллов к более холодным материалам модулей с меньшей теплоемкостью разработаны и изучены дополнительные конструктивные способы уменьшения тепловых сопротивлений слоев с низкой теплопроводностью. Это позволяет перераспределить и снизить температуру в элементах конструкции МКМ и повысить прочность и надежность изделий. Гистограмма эффективности применения некоторых вариантов теплоотвода приведена на рис.2.

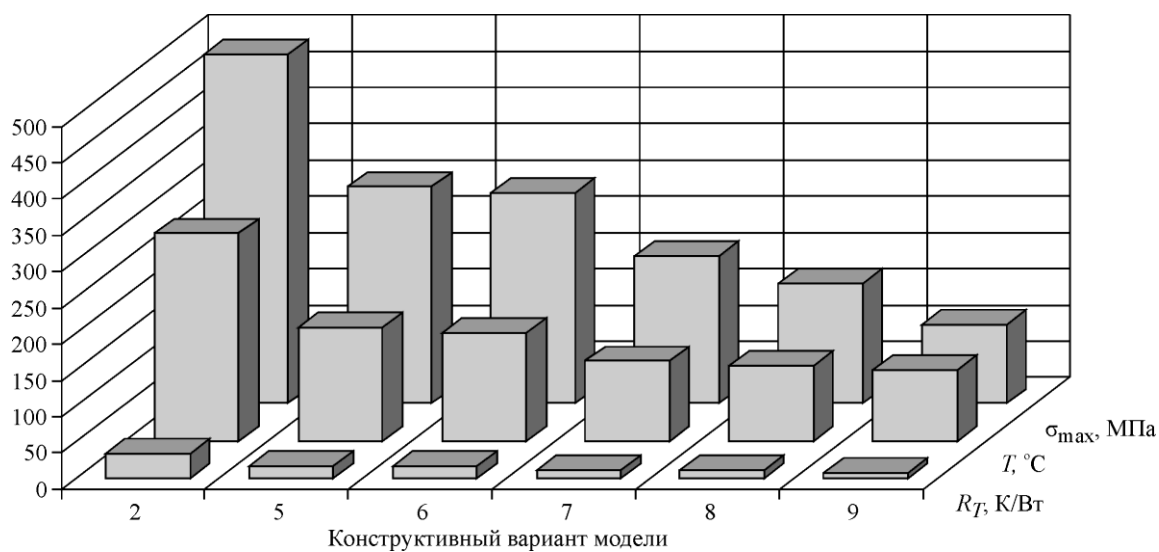


Рис.2. Гистограмма эффективности обеспечения теплоотвода в МКМ для различных вариантов модели (R_T – полное тепловое сопротивление конструкции)

Разработана конструкция МКМ со встроенным плоским теплоотводом, выполненным в виде алюминиевой (вариант 5) или медной (вариант 6) шины, закрепленной с помощью теплопроводящего клея на основании под трехмерным модулем с одной стороны и между вторым и третьим кристаллами внутри модуля с другой стороны [3]. Использование теплоотводов значительно снижает нагрев и напряжения материалов. Применение алюминиевой шины может быть экономически обосновано, однако менее эффективно ввиду меньшей теплопроводности материала по сравнению с медью. Это приводит к повышению теплового сопротивления конструкции на 0,2 К/Вт

(с 3,2 до 3,4 К/Вт), максимальной температуры на 9 °С (с 148 до 157 °С) и напряжения на 9 МПа (с 290 до 299 МПа).

Уменьшение толщины полиимидных слоев с 50 до 25 мкм для конструкции МКМ со встроенным медным теплоотводом (вариант 7) приводит к снижению теплового сопротивления до 2,2 К/Вт, максимальной температуры до 110 °С и напряжения до 204 МПа.

Формирование в полиимидных слоях сквозных окон размером 7×7 мм, которые заполняются теплопроводящим клеевым материалом одновременно со сборкой трехмерного модуля (вариант 8), обеспечивает снижение теплового сопротивления до 2,1 К/Вт, максимальной температуры до 103 °С и напряжения до 166 МПа.

Наибольшее снижение теплового сопротивления до 1,4 К/Вт обеспечивается комплексным конструктивным решением при одновременном уменьшении толщины полиимидных слоев до 25 мкм и использовании в них сквозных окон размером 7×7 мм (вариант 9). В этом случае максимальная температура нагрева материалов составляет 97 °С, а напряжение снижается до 109 МПа. Однако применение этого конструктивного варианта ограничивается тем, что использование тонких полиимидных пленок для гибких коммутационных плат МКМ может приводить к их механическому повреждению при сборке трехмерной структуры или в результате различных воздействий при эксплуатации изделий.

Заключение. Прочность конструкций и нормальное функционирование МКМ возможно при поддержании температуры материалов в определенных пределах. Изменение теплового режима оказывает существенное влияние на характеристики изделий и может приводить к отказам при эксплуатации. Для обеспечения эксплуатационной надежности необходим инженерный расчет тепловых режимов и рациональный выбор конструктивных параметров модулей.

Исследования эффективности разработанных способов обеспечения интенсивной теплопередачи в конструкциях модулей и прочностной надежности изделий показали следующее. Наилучшие результаты достигаются при использовании в конструкциях трехмерных МКМ плоских теплоотводов, выполненных в виде медных шин, и полиимидных пленок толщиной 25 мкм со сформированными в них сквозными окнами, которые при сборке заполняются теплопроводящим клеевым материалом. Эти конструктивные решения могут быть рекомендованы к применению при проектировании теплонагруженных модулей и позволяют уменьшать тепловое сопротивление до 4,8 раз, обеспечивая надежное функционирование изделий.

Литература

1. *Гуськов Г.Я., Блинов Г.А., Газаров А.А.* Монтаж микроэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1986. – 176 с.
2. *Грушевский А.М.* Сборка и монтаж многокристалльных микромодулей: уч. пособие / *Под ред. Л.А. Коледова.* – М.: МИЭТ, 2003. – 196 с.
3. *Поголов А.И., Блинов Г.А., Чугунов Е.Ю.* Теплофизические расчеты и конструирование многослойных структур микроэлектронных приборов // Конструкции из композиционных материалов. – 2012. – № 4. – С. 3–7.
4. *Кузнецов О.А., Поголов А.И., Сергеев В.С.* Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1990. – 144 с.
5. *Поголов А.И., Блинов Г.А., Чугунов Е.Ю.* Тепловой режим функциональных многокристалльных модулей в трехмерном исполнении // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2013. – № 1. – С. 77–82.

6. **Феодосьев В.И.** Сопротивление материалов: учеб. для вузов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 592 с.

7. **Поголов А. И., Блинов Г.А., Чугунов Е.Ю.** Моделирование термопрочности многокристалльных микромодулей // Изв. вузов. Электроника. – 2010. – № 5. – С. 73–75.

8. **Поголов А.И., Блинов Г.А., Чугунов Е.Ю.** Напряженно-деформированное состояние и тепловой режим многослойных клеевых соединений многокристалльных микромодулей // Конструкции из композиционных материалов. – 2013. – № 2. – С. 18–22.

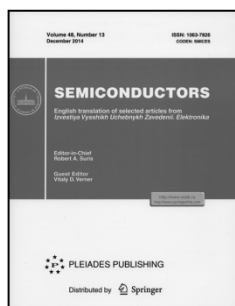
Статья поступила
1 апреля 2016 г.

Поголов Анатолий Иванович – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой технической механики МИЭТ. *Область научных интересов:* механика материалов и конструкций микроприборов.

Блинов Геннадий Андреевич – доктор технических наук, профессор кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* твердотельная электроника, технология сборки и монтажа микросхем.

Чугунов Евгений Юрьевич – аспирант кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* конструирование и технологии микроэлектронных средств и аппаратуры. **E-mail:** Chugunov-EU@inbox.ru

Уважаемые авторы и читатели!



Вышел в свет журнал
SEMICONDUCTORS

Vol. 50, N 13, 2016. - ISSN: 1063-7826

<http://pleiades.online>

<http://link.springer.com>