

Возможности LTCC-технологии

для уменьшения теплового сопротивления мощных высоконадежных КИМП

В статье приведены сравнительные оценки теплового сопротивления стандартных конструкций металлокерамических корпусов из НТСС-керамики и аналогичных конструкций, выполненных из LTCC-керамики.

Виктор Черных

Chernykh.V@ostec-group.ru

Сергей Чигиринский

sch@ostec-group.ru

В практике производства высоконадежной элементной базы существует направление создания комплектующих изделий межведомственного применения (КИМП), максимально приближенных по габаритно-присоединительным размерам к аналогам, выпускаемым в пластмассовом исполнении (рис. 1, 2). Это диктует необходимость использования уже созданной архитектуры построения аппаратуры, что можно проследить практически у всех производителей элементной базы, в частности, у фирмы International Rectifier (IR). Аналогичные работы проводятся и отечественными предприятиями [1] (рис.3, 4).

Использование вакуумплотной керамики в качестве конструкционного материала платы требует применения в комплектующих корпусов (выводная рамка, радиатор, ободок, крышка) специальных сплавов, КТЛР (коэффициент термического линейного расширения) которых максимально близок к такому параметру керамики. Это могут быть медь, плакированная сплавом 29НК (42Н), псевдосплавы МД40 или ВД30. Отличительная особенность этих материалов — значительно меньшая теплопроводность по сравнению с медью (390 Вт/м·К), используемой в КИМП в пластмассовых корпусах. Основные характеристики таких материалов представлены в таблице 1.

Таким образом, замена меди на традиционные для металлокерамических корпусов сплавы в качестве металлокомплектующих приводит к увеличению теплового сопротивления (R_{θ}) более чем на порядок



Рис. 1. Корпуса массовых КИМП в пластмассовом исполнении



Рис. 3. Металлокерамические корпуса производства ОАО «ДЗРД» (г. Донской)

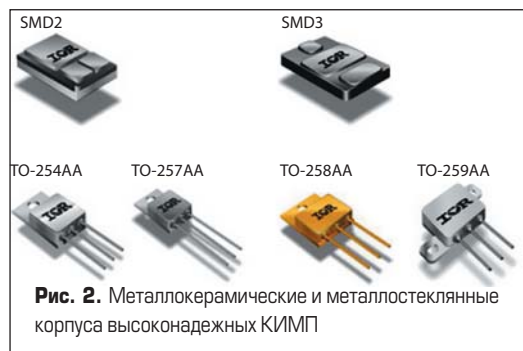


Рис. 2. Металлокерамические и металлоглазненные корпуса высоконадежных КИМП



Рис. 4. Металлокерамические корпуса производства ОАО «Завод Марс» (г. Торжок)

Таблица 1. Основные характеристики материалов металлокомплектующих для корпусов

Наименование	Состав, %		Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К	КТЛР в интервале температур $\alpha \times 10^{-6}$, 1/°C	
				+20...+500 °C	+20...+700 °C
Лента 42Н	Основное	Ni — 41,5–43,0	19,2	5,4	7,5
	Не более	Mn — 0,4 C — 0,03 Si — 0,3 S — 0,015 P — 0,015 Cu — 0,1			
	Остальное	Fe			
Лента 29НК	Основное	Ni — 28,5–29,5; Co — 17,0–18,0	19,2	5,0	6,4
	Не более	Mn — 0,4 C — 0,03 Si — 0,3 S — 0,015 P — 0,015 Cr — 0,1 Cu — 0,2 Al — 0,2			
	Остальное	Fe			
Лента ФМФ	Биметалл, от общей толщины: медь (МВ) — 70; 42Н — 30		280 вдоль слоя, 34,6 поперек слоя	7,2	8,3
Лента КМК	Биметалл, от общей толщины: медь (МВ) — 70; 29НК — 30		280 вдоль слоя, 34,6 поперек слоя	7,2	8,3
Медь МВ	Cu — не менее 99,99; сумма примесей — не более 0,013		390	165 при +100°C	
Эльканайт (ВД30)	Основное	W — 69–71 B — 0,05–0,15 Li — 0,05–0,15 Mn — 0,1–0,3 Ni — 0,2–0,4 Si — 0,2–0,4	127 при +20 °C, 283 при +150 °C	7,5	
	Остальное	Cu			

Таблица 2. Основные элементы конструкции корпусов ТО

Деталь	Материал	Примечание
Вывод столбиковый	29НК или 42Н	
Выводная рамка	ФМФ или КМК	
Ободок	ФМФ или КМК	
Припойная прокладка	ПСр72В	По одной для пайки радиатора к выводной рамке и выводной рамки к плате
Припойная прокладка	ПСр72В	1 шт. для пайки ободка к плате
Припойная прокладка	ПСр72В	2 шт. для пайки крайних выводов к плате
Радиатор	МД-40 или ВД30	
Металлизированная керамическая плата	ВК94-1	
Припойная прокладка	ПСр72В	2 шт. для пайки столбиковых выводов к плате

при применении лакированных материалов ФМФ или КМК и на 30–40% при использовании псевдосплавов МД-40, ВД30.

Следует отметить, что типовая конструкция металлокерамических корпусов ТО (рис. 5, таблица 2) и SMD для силовых полупроводниковых приборов [2, 3] имеет более 10 конструктивных элементов, а сборка/пайка требуют значительных трудозатрат и не позволяют автоматизировать процесс.

Для снижения R_t в таких конструкциях применяются теплорассекатели (рис. 6), что усложняет конструкцию корпуса и приводит к снижению процента выхода годных.

Таким образом, стандартные конструкции высоконадежных корпусов мощных КИМП в принципе не могут соперничать по величине R_t с аналогами в пластмассовых корпусах. Для углубленного понимания развития этого направления следует сделать небольшое отступление, описывающее процесс теплопередачи в КИМП.

С точки зрения тепловых процессов, силовые КИМП могут функционировать, если предусмотрен эффективный отвод тепла через многослойную структуру к охлаждаемой

воздухом наружной поверхности корпуса [4]. Основной фактор, обеспечивающий максимальную производительность полупроводниковых приборов, — эффективность передачи тепла от поверхности к воздуху, характеризуемая R_t . Чем оно ниже, тем лучше отвод тепла. На практике распределение тепла внутри устройства никогда не бывает равномерным. Всегда существуют так называемые «горячие» точки. Например, если источник тепла — кристалл тиристора (транзистора) или выпрямительная диодная сборка, передача тепла от них осуществляется по конусообразному каналу (конической тепловой трубе) аналогично тому, как распространяются звуковые волны или свет. Однако, поскольку источники тепла имеют определенные размеры и конфигурацию, точный конус не образуется. Передача тепла, например, от кристалла в окружающий воздух определяется толщиной слоев и R_t

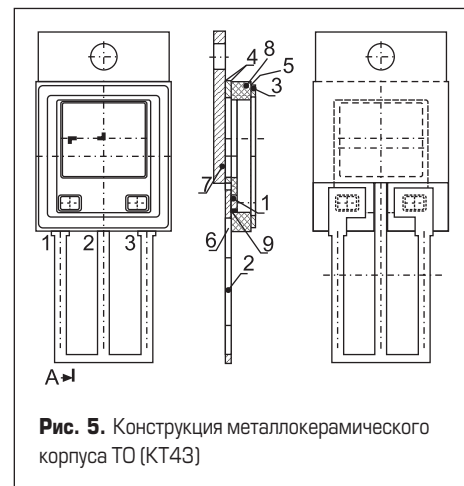


Рис. 5. Конструкция металлокерамического корпуса ТО (КТ43)

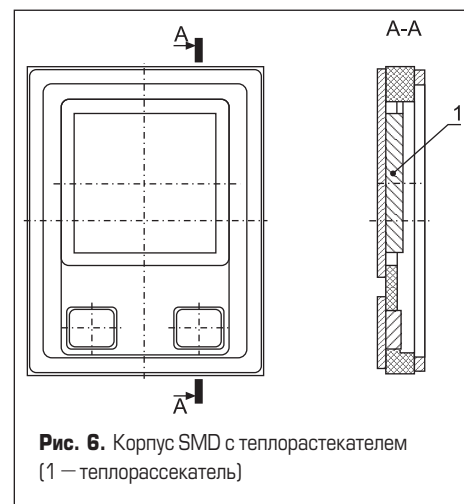


Рис. 6. Корпус SMD с теплорассекателем (1 — теплорассекатель)

материалов, а также площадью их касания (чем она больше, тем большее количество тепла может быть передано). Часто недостаточное внимание уделяется тому факту, что неблагоприятный эффект от воздействия высокого R_t увеличивается по мере приближения к источнику тепла. Тогда, чем дальше от источника тепла находится слой материала, тем шире в этом месте конус тепловой трубы, и, следовательно, снижается влияние R_t данного материала. Это означает, что даже самый хороший теплоотвод с вентиляцией не обеспечит охлаждения кристалла, если переходы «кристалл–корпус» и «корпус–теплоотвод» имеют неоправданно высокое R_t .

R_t — характерная величина для каждого типа прибора, она зависит от площади полупроводниковых кристаллов, от площади, толщины и типа материалов между чипами и основанием, от технологического процесса и качества изготовления. R_t связывает предельные электрические возможности по передаче мощности с тепловыми ограничениями.

R_t — это сумма тепловых сопротивлений материалов на пути отвода тепла от кристалла. Цепочка R_t на рис. 7 отображает типичный путь отвода тепла от мощного полупроводникового прибора.

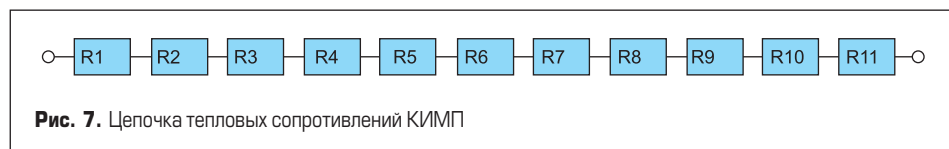
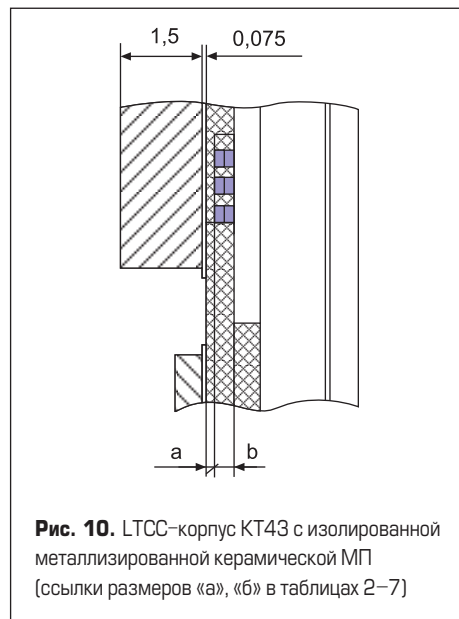
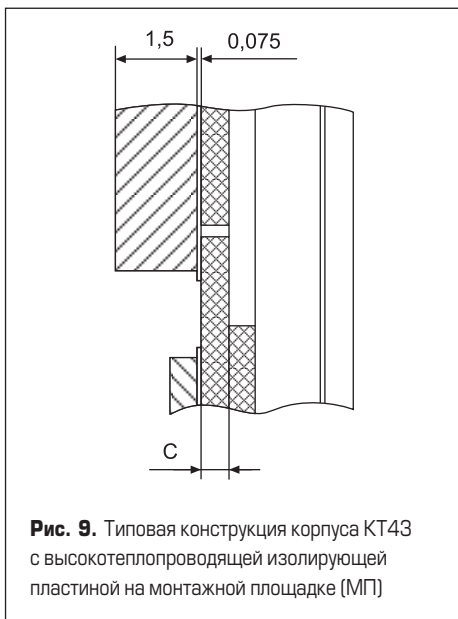
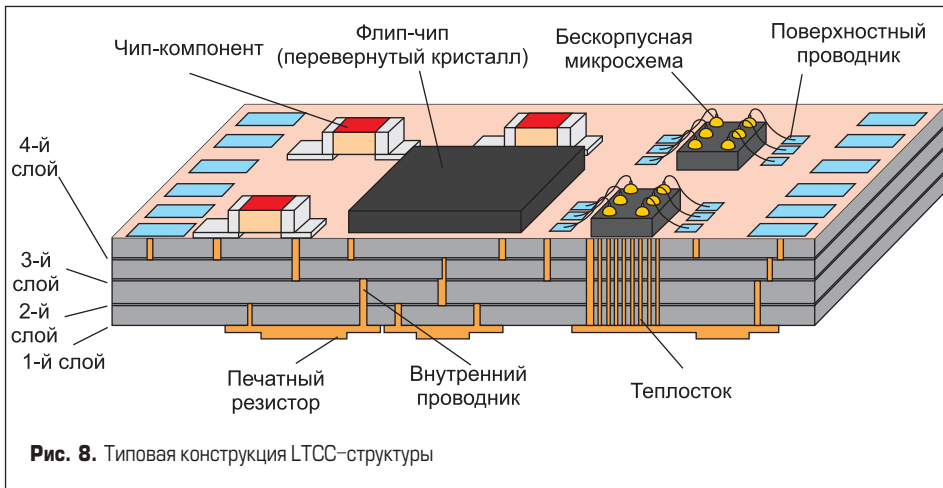


Рис. 7. Цепочка тепловых сопротивлений КИМП



$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_9 + R_{10} + R_{11}$$

Полное R_t сложной системы, например многослойной тепловой изоляции, равно сумме R_t ее частей. Общая формула:

$$R_t = (T_2 - T_1) / P,$$

где: R_t — тепловое сопротивление на участке тепловой цепи, К/Вт; T_2 — температура начала участка, К; T_1 — температура конца участка,

К; P — тепловой поток, протекающий через участок цепи, Вт.

R_t участка цепи постоянного сечения:

$$R_t = l / \lambda S,$$

где: l — длина участка, м; λ — коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); S — площадь поперечного сечения участка, м².

Варианты снижения R_t корпусов мощных КИМП:

- максимальное использование материалов с высокой теплопроводностью;
- для материалов с низкой теплопроводностью — обеспечение технологической возможности изготовления слоев минимальной толщины.

Ряд предприятий проявляют повышенный интерес к керамическим структурам LTCC, отличающимся от HTCC-структур более низкими издержками при их производстве и использованием для формирования в конструкции плоскостных и межслойных проводников и теплостоков высоко электро- и теплопроводных материалов (паст на основе Ag, Au). Отличительная особенность создания LTCC-структур — наличие апробированных прикладных программ, позволяющих проводить расчеты тепловых параметров КИМП и их моделирование на стадиях разработки.

Представленная на рис. 8 типовая конструкция LTCC-структуры реализуется при использовании для ее производства оборудования фирмы Keko-equipment и керамических листов, проводниковых и резистивных паст фирмы Ferro.

Сравнение расчетной оценки R_t корпуса ТО (KT43) с изолированной монтажной площадкой (МП) типовой конструкции (рис. 9) и изготовленного по LTCC-технологии (рис. 10) приведено в таблицах 3, 4.

Сравнение расчетной оценки R_t для корпуса типа SMD (цепи «МП (10×10 мм)–внешняя среда») приведено в таблицах 5, 6.

Расчеты позволяют сделать следующие выводы:

- R_t «МП–плоскость основания» LTCC-корпуса KT43 при необходимости введения изолирующего слоя между кристаллом и радиатором (толщина 5 мкм) соизмеримо с R_t серийного корпуса при монтаже кристалла на изолирующую пластину из AlN и в 1,4 раза выше R_t в случае использования такой пластины из полиалмаза. R_t LTCC-конструкции корпусов KT43 можно снизить на 20–30% посредством:
 - уменьшения толщины изолирующего слоя от 3 мкм до минимально возможных величин, гарантированно отливаемого на литьевых машинах фирмы Keko-equipment;

Таблица 3. Результаты расчетов для корпуса типа KT43

Материал слоя	Толщина (l) слоя, м	Коэффициент теплопроводности слоя λ , Вт/м·К	Площадь поперечного сечения слоя S , м ²	R_t , К/Вт	Количество элементов слоя, шт.	Общее R_t слоя, К/Вт
Обязательные элементы конструкции корпуса						
Радиатор, сплав МД40	0,0015	250	0,0001	0,0600	1	0,0600
Припой на основе серебра для пайки радиатора к плате	0,000075	340	0,0001	0,0022	1	0,0022
Итого:						0,0622
Элементы конструкции LTCC-корпуса						
Керамический слой (а) толщиной 5 мкм	0,000005	4	0,0001	0,0125	1	0,0125
Керамический слой (б) толщиной 400 мкм	0,0004	4	0,000043	2,3103	1	2,3103
Металлизационный слой пасты (столбики диаметром 0,5 мм) на основе серебра высотой 400 мкм	0,0004	350	0,000057	0,0202	289	0,0202
				Итого	при 5-мкм керамическом слое (а)	0,0325

Примечание: Теплопроводность пасты на основе серебра принята равной 70% от значения чистого металла.

Таблица 4. Элементы конструкции HTCC-корпуса типа КТ43 с высокотеплопроводящей изолирующей пластиной на МП

Материал слоя	Толщина (l) слоя, м	Коэффициент теплопроводности слоя λ , Вт/м·К	Площадь поперечного сечения слоя S, м ²	R _v , К/Вт	Количество элементов слоя, шт.	Общее R _v слоя, К/Вт
Радиатор, сплав МД40	0,0015	250	0,0001	0,06	1	0,06
Припой на основе серебра для пайки радиатора к пластине	0,000075	340	0,0001	0,0022	1	0,0022
Металлизированная пластина из AlN	0,0004	160	0,0001	0,0250	1	0,0250
Металлизированная пластина из полиалмаза	0,0004	1000	0,0001	0,0040	1	0,0040
				Итого	с 400-мкм AlN-пластиной (с)	0,0872
					с 400-мкм пластиной из полиалмаза (с)	0,0662
Суммарное R _v корпуса типа КТ43 (изолированная МП)						
Конструкция LTCC-корпуса типа КТ43 с металлизированной керамической МП						
				Итого	при 5-мкм керамическом слое (а)	0,0947
Конструкция HTCC-корпуса типа КТ43 с высокотеплопроводящей изолирующей пластиной на МП						
				Итого	с 400-мкм AlN-пластиной (с)	0,0872
					с 400-мкм пластиной из полиалмаза (с)	0,0662

Таблица 5. Расчеты для корпуса SMD

Материал слоя	Толщина (l) слоя, м	Коэффициент теплопроводности слоя λ , Вт/м·К	Площадь поперечного сечения слоя S, м ²	R _v , К/Вт	Количество элементов слоя, шт.	Общее R _v слоя, К/Вт
Существующая конструкция HTCC-корпусов типа SMD	0,0015	250	0,0001	0,06	1	0,06
Дно большое, КМК	0,0005	34,6	0,0001	0,1445	1	0,1445
				Итого		0,1445
Конструкция LTCC-корпусов SMD с металлизированной керамической МП						
Керамический слой (в) толщиной 500 мкм	0,0005	4	0,000043	2,8879	1	2,88792
Металлизационный слой пасты (столбики на основе серебра высотой 500 мкм и диаметром 0,5 мм)	0,0005	350	0,000057	0,0252	289	0,02519
				Итого		0,02497

Примечание: Размеры а, в, с установлены из требований операций сборки/пайки, посадки и разварки кристалла.

- увеличения количества и размера металлизированных отверстий, что обеспечивается установками пробивки отверстий и заполнения пастой фирмы Kecko-equipment.
- R_v LTCC-корпуса КТ43 при электрических связях «кристалл–плоскость основания корпуса» в три раза ниже R_v серийного корпуса. Это позволяет повысить надежность КИМП и отказать в конструкции прибора от радиатора, значительно улучшить массо-габаритные характеристики изделий. Такое утверждение справедливо и для аналогично доработанных конструкций корпусов типа SMD (0,5; 1; 2; 3). При этом R_v снижается почти в шесть раз.
- Исключение из конструкции LTCC-корпусов КТ43 радиатора позволяет увеличить на 1–1,5 мм размеры МП, что обеспечит монтаж кристаллов с большими размерами (исключается площадь для напайки

термокомпенсирующего кольца между керамической HTCC-платой и радиатором) и повысит рабочее напряжение приборов с 600 до 1600 В (увеличение гарантированных зазоров между токопроводящими элементами конструкции с 0,5 до 1,7 мм).

В связи с увеличением степени интеграции все острее встает вопрос отвода тепла от программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), монтируемых в многослойные HTCC-корпуса CQFP240, CQFP256 зарубежного и российского производства. Для этого проведены разработки по введению в конструкцию корпуса в качестве материала монтажной площадки пластины из AlN, спаянной припоем ПСр72 с керамической платой корпуса из алюмооксидной HTCC керамики. Однако при проведении отбраковки ПЛИС выявлена низкая устойчивость конструкции к повышенным линейным нагрузкам (до 10 000 g).

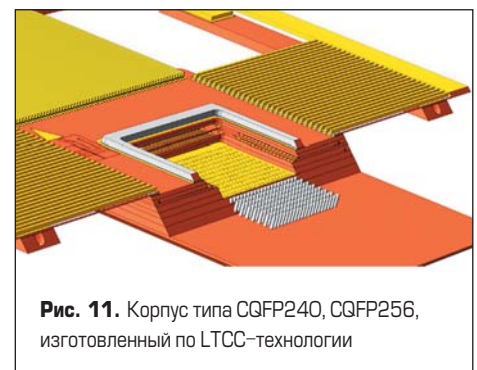


Рис. 11. Корпус типа CQFP240, CQFP256, изготовленный по LTCC-технологии

Происходит разгерметизация пластины из AlN и керамической HTCC-платы по паяному шву.

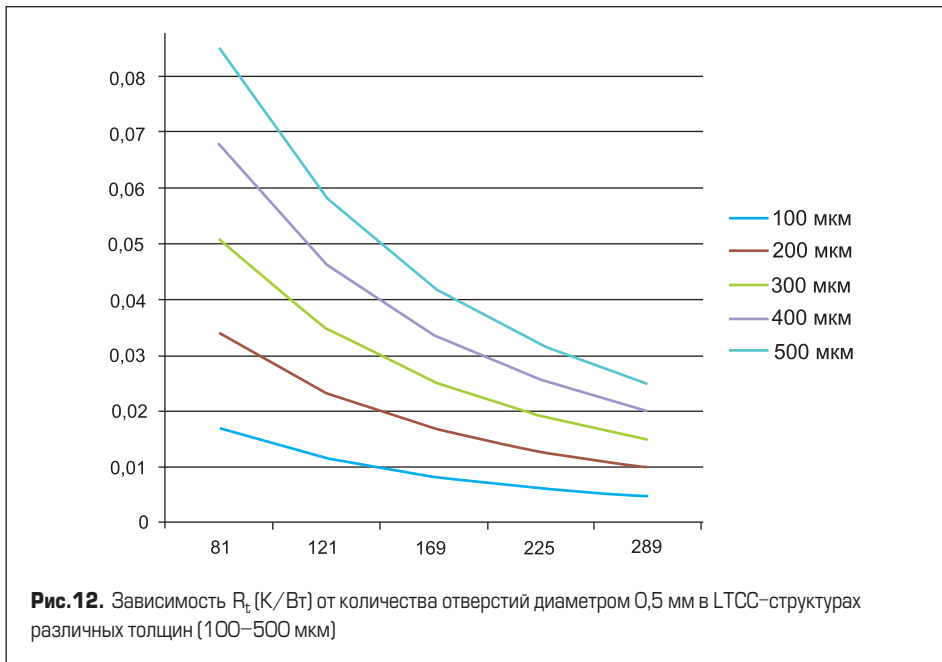
Расчетная оценка значений R_v конструкций корпуса типа CQFP240, CQFP256 с изолированной МП типовой конструкции, изготовленного по LTCC-технологии (рис. 11), приведена в таблицах 6 и 7.

Таблица 6. Элементы конструкции HTCC-корпуса CQFP240(256) существующей конструкции (без AlN-пластины)

Материал слоя	Толщина (l) слоя, м	Коэффициент теплопроводности слоя λ , Вт/м·К	Площадь поперечного сечения слоя S, м ²	R _v , К/Вт	Количество элементов слоя, шт.	Общее R _v слоя, К/Вт
Керамический слой (а) толщиной 500 мкм	0,0005	18	0,0001	0,2778	1	0,2778

Таблица 7. Элементы конструкции LTCC-корпуса с пониженным R_v

Материал слоя	Толщина (l) слоя, м	Коэффициент теплопроводности слоя λ , Вт/м·К	Площадь поперечного сечения слоя S, м ²	R _v , К/Вт	Количество элементов слоя, шт.	Общее R _v слоя, К/Вт
Керамический слой (а) толщиной 15 мкм	0,000015	4	0,0001	0,0375	1	0,0375
Керамический слой (в) толщиной 400 мкм	0,0004	4	0,000043	2,3103	1	2,3103
Металлизационный слой пасты (столбики диам. 0,5 мм) на основе серебра (в) высотой 400 мкм	0,0004	350	0,000057	0,0202	289	0,02015
				Итого		0,05748
				Снижение R _v , раз		4,8



В общем виде зависимости R_t LTCC-системы от количества отверстий теплостоков и толщины керамической карты представлены на рис. 12.

Возможности LTCC-технологии в сочетании с оборудованием фирмы Keeko-equipment для обработки сырых структур позволяют решать на новом конструктивно-технологическом уровне проблему отвода тепла от особо нагруженных узлов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), требующих обеспечения жидкостного охлаждения [5] (рис. 13, 14).

В целом следует отметить, что внедрение LTCC-технологии для производства высоконадежных корпусов мощных КИМП позволит не только обеспечить требуемые величины R_t , автоматизировать процесс их разработки и изготовления, снизить в целом себестоимость РЭА при повышении качества и надежности, но и создать новые конструктивы, отличающиеся от существующих аналогов меньшими габаритами и массой. Один из крупнейших в мире произво-

дителей корпусов — компания Куосега (Япония) — уже начала перевод части конструктивов корпусов с HTCC на LTCC.

Литература

1. Офицеров С. В., Черных В. А. Разработки металлокерамических корпусов для вторичных источников электропитания и силовой электроники // Силовая электроника. 2005. № 4.
2. Пат. № 232729 (РФ) Корпус полупроводникового прибора с высокой нагрузкой по току (варианты) / С. В. Офицеров, Ф. К. Насибуллин, А. М. Заика, В. А. Черных, Т. И. Попова // 16.06.2006.
3. А. с. на полезную модель. Заявка: 2008115595/22 / А. И. Гордеев, И. А. Богатеева, А. Н. Алферов, Т. Б. Крицкая, П. Р. Машевич, Г. Н. Савина, В. А. Черных // 23.04.2008.
4. Исламгазина Л. Применение различных материалов, обеспечивающих оптималь-



ные тепловые режимы силовых полупроводниковых приборов, в том числе модулей и твердотельных реле // Силовая электроника. 2005. № 3.

5. SANDIA REPORT, SAND2007-1871, Unclassified Unlimited Release, Printed March, 2007.