

УДК 669.018.95

Е.Н. Каблов, Б.В. Щетанов, А.А. Шавнев, А.Н. Няфкин, В.В. Чибиркин, В.В. Елисеев, В.А. Мартыненко, В.Г. Мускатиньев, Л.А. Эмих, С.М. Вдовин, К.Н. Ницев

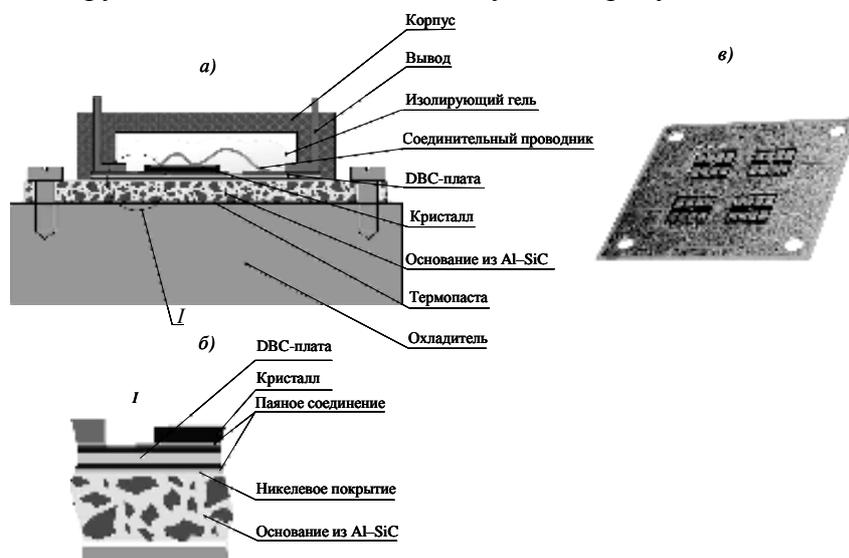
ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИЛОВЫХ IGBT-МОДУЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОНАПОЛНЕННОГО МКМ СИСТЕМЫ Al-SiC

Основным фактором обеспечения максимальной производительности полупроводниковых приборов является эффективность передачи тепла от кристалла к теплоносителю, характеризуемая тепловым сопротивлением. Силовые модули, с точки зрения тепловых процессов, могут надежно функционировать при условии, что имеется эффективный отвод тепла. В сложной многослойной конструкции для отвода тепла основная роль отводится теплоотводящим основаниям. Это особо актуально при растущей потребности в новых силовых полупроводниковых приборах, где теплоотводящие основания должны обладать высокой теплопроводностью и низким коэффициентом термического расширения.

Ключевые слова: высоконаполненный металлматричный композиционный материал системы Al-SiC, силовые полупроводниковые приборы (например, IGBT-модули), теплоотводящие основания, тепловое сопротивление, теплопроводность, коэффициент термического расширения.

В настоящее время твердотельная силовая электроника широко используется в регулируемых технологическом и тяговом электроприводах, вторичных источниках питания, в металлургии, химии, машиностроении, связи и энергетике.

Практически все типы оборудования средней мощности (от десятков киловатт до единиц мегаватт) разрабатываются с использованием силовых модулей на биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT). В настоящее время силовые IGBT-модули выпускаются на ток 100÷2400 А и коммутлируемое напряжение до 3,3 кВ. Рассмотрим конструкцию типичного IGBT-модуля (см. рисунок, а, б).



Схематичное изображение IGBT-модуля (а), DBC-плата с напаянными полупроводниковыми кристаллами (в) и схема ее соединения с теплоотводящим основанием (б)

Силовые модули, с точки зрения тепловых процессов, могут функционировать при условии, что имеется эффективный отвод тепла, осуществляемый через многослойную структуру к наружной поверхности корпуса. В связи с постоянно растущей концентрацией энергии в электронных схемах, высокая теплопроводность и низкий коэффициент термического расширения (КТР) теплоотводящих оснований – становятся решающим критерием для проектирования высокоомощных модулей. Основным факто-

ром, обеспечивающим максимальную производительность полупроводниковых приборов, является эффективность передачи тепла от кристалла к теплоносителю, характеризующаяся тепловым сопротивлением, – чем ниже тепловое сопротивление, тем лучше отвод тепла. На практике распределение тепла внутри устройства никогда не является равномерным. Если источником тепла является кристалл, то передача тепла от него осуществляется по конусообразному каналу (конической тепловой трубе) – аналогично тому, как распространяются звуковые волны или свет.

Передача тепла из одного места (кристалл) в другое (теплоноситель, окружающая среда) определяется толщиной слоев и тепловым сопротивлением материалов, а также площадью их соединения (чем больше площадь, тем большее количество тепла в единицу времени может быть передано). Часто недостаточное внимание уделяется тому, что неблагоприятный эффект от воздействия высокого теплового сопротивления увеличивается по мере приближения к источнику тепла, т. е. чем дальше от источника тепла находится слой материала, тем шире в этом месте конус тепловой трубы, а следовательно, снижается влияние теплового сопротивления этого материала. Это означает, что даже самый хороший теплоотвод с вентиляцией не обеспечит охлаждения кристалла, если переходы кристалл–корпус и корпус–теплоотвод имеют неоправданно высокие значения теплового сопротивления. Предельные характеристики (ток, напряжение, мощность) ограничиваются максимальной температурой кристалла, которая не должна быть превышена ни при каких режимах работы полупроводникового прибора.

Для изолирования кристалла IGBT (см. рисунок, в) от охладителя, он размещается на изолирующей пластине – DBC-плате (технология Direct Bonded Copper – прямое нанесение меди) из специальной керамики (на основе Al_2O_3 или AlN) с низким КТР, высокими теплопроводностью и электрической прочностью. В конструкции с DBC-керамикой тепло, выделяемое силовыми полупроводниковыми приборами (кристаллами), распределяется первоначально в верхнем слое металлизированной керамики, затем равномерно – по всей толщине изолирующей теплопроводящей подложки, проходит через нижний металлический слой и передается основанию прибора и, наконец, – охладителю. Таким образом, конус тепловой трубы становится шире, и, следовательно, снижается тепловое сопротивление.

Полупроводники – кристаллические материалы с чрезвычайно низким КТР. При конструировании элементов конструкции, в которой должны быть собраны электронные модули, необходимо учитывать тот факт, что многократное циклическое расширение и сжатие приводит к разрушению кристаллов в результате тепловых напряжений.

Исходя из вышесказанного совершенно очевидным становится то, что используемые в настоящее время теплоотводящие основания на основе меди и ее сплавов не соответствуют постоянно возрастающим требованиям к новым приборам силовой электроники по причине их высоких КТР, плотности и стоимости. Как показывает практика, при пайке металлокерамики на медное основание ухудшается качество поверхности основания, появляются местные напряжения и изгибы.

Изменение кривизны поверхности медного основания при пайке очень трудно поддается контролю, зависит от геометрии сопрягаемых поверхностей, режимов охлаждения после пайки, толщины и свойств паяемых материалов, раскроя и направления проката медного листа и т. д. На практике выявлено, что существует прямая зависимость между деформацией медного основания после пайки и отношением длины медного основания к его ширине. Увеличение площади соединения металлокерамики и медного основания также ведет к увеличению кривизны поверхности.

Необходимость получения качественного паяного соединения и уменьшения деформации медного основания после пайки и охлаждения накладывает жесткие ограничения на размер металлокерамической платы и, следовательно, на допустимую плотность мощности. Из-за этого в силовых модулях приходится применять несколько DBC-плат с зазором между ними, что значительно усложняет процесс сборки изделия.

После определенного числа термоциклов, из-за постепенного разрушения припоя, ухудшается тепловой контакт между металлокерамической платой и медным основанием, что влечет за собой повышение градиента температуры, а также перегрев и тепловое разрушение полупроводникового элемента.

Проблема устраняется использованием конструкции модуля с применением металлического композиционного материала (МКМ) на основе алюминиевого сплава, армиро-

ванного частицами карбида кремния (система Al–SiC), – в качестве теплоотводящего основания [1]. Данный материал обладает уникальными свойствами: высокими теплопроводностью и механической прочностью, низкими КТР и плотностью. В отличие от традиционных материалов, изменяя величины в соотношении Al (матрица)–SiC (наполнитель), можно точно задать физические свойства нового материала в соответствии с техническими требованиями – для применения во многих ответственных областях. Уникальная совокупность этих свойств позволяет минимизировать термические напряжения в конструкции силовых модулей, достичь высочайших надежности и ресурса при циклических нагрузках (не менее 100 тыс. циклов) силовых IGBT-модулей с применением МКМ.

Уже в настоящее время в силовой электронике МКМ системы Al–SiC используются в мощных полупроводниковых IGBT-модулях, работающих в жестких условиях эксплуатации во всех климатических зонах. Такие модули производят американские фирмы «Ceramics Process Systems» (CPS) и «Thermal Transfer Composites» (TTC) и др. [1–3]. В настоящее время фирмой CPS, в зависимости от выполняемых задач, выпускается ряд теплоотводящих изделий из Al–SiC нескольких марок с различными свойствами.

В научно-исследовательских центрах Китая также активно ведутся работы по созданию материала на основе системы Al–SiC.

Годовые затраты на закупку зарубежных изделий из материала системы Al–SiC в России составляют несколько миллионов долларов. Этот материал закупают также крупнейшие электронные компании мира: Infineon, Mitsubishi Electric, Hitachi, Semikron, Fuji, Semelab и др. В России композиционный материал системы Al–SiC для силовой электроники не выпускается.

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ», г. Москва) совместно с ОАО «Электровыпрямитель» и МГУ им. Н.П. Огарева приступили к выполнению крупного инновационного проекта по созданию и применению в изделиях силовой электроники отечественного высоконаполненного МКМ системы Al–SiC.

Во ФГУП «ВИАМ» и ОАО «Электровыпрямитель» в течение 2008–2010 гг. за счет собственных средств выполнен цикл научно-исследовательских работ по созданию размеростабильных изделий из МКМ системы Al–SiC с необходимыми эксплуатационными свойствами.

Результаты проведенных испытаний по основным теплофизическим и механическим свойствам МКМ системы Al–SiC представлены в табл. 1 и 2 (в сравнении с техническими требованиями, предъявляемыми ОАО «Электровыпрямитель» к теплоотводящим основаниям из данного материала).

Таблица 1

Теплофизические свойства МКМ системы Al–SiC в сравнении с техническими требованиями ОАО «Электровыпрямитель»

Материал	Объемное содержание SiC, %	Плотность, г/см ³	КТР: $\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹	Удельная теплоемкость (при 20°C), кДж/кг·К	Теплопроводность, Вт/м·К
МКМ системы Al–SiC	70	3,0	5,8	0,75	160
Требования Заказчика	70	3,0	5,0–7,0	0,75	180–200

Из представленных теплофизических свойств МКМ системы Al–SiC видно (см. табл. 1), что по всем показателям (за исключением свойств по теплопроводности) полученный материал соответствует требованиям ОАО «Электровыпрямитель» (Заказчика). Что касается свойств по теплопроводности, то в настоящее время во ФГУП «ВИАМ» совместно с ОАО «Электровыпрямитель» и МГУ им. Н.П. Огарева проводятся комплексные научно-исследовательские работы по повышению значений данной характеристики при сохранении остальных теплофизических свойств.

Таблица 2

Механические свойства МКМ системы Al–SiC в сравнении с техническими требованиями ОАО «Электровыпрямитель»

Свойства	σ_b , МПа	$\sigma_{b,изг}$, МПа	E , ГПа
МКМ системы Al–SiC	160	340	245
Требования Заказчика	125–235	300–370	220–230

Из представленных данных по механическим свойствам видно (см. табл. 2), что свойства МКМ системы Al–SiC полностью соответствуют требованиям к материалу.

Поскольку соединение теплопроводящих оснований с другими элементами конструкции модуля проводится с помощью пайки, то их поверхность должна быть покрыта металлическим (никелевым) покрытием, обладающим хорошей паяемостью. В настоящее время эта задача решается во ФГУП «ВИАМ» совместно с ОАО «Электровыпрямитель» и МГУ им. Н.П. Огарева.

Для проведения комплекса испытаний теплоотводящих оснований в составе изделия М2ТКИ-300-17КТ были изготовлены опытные образцы модулей на основе теплоотводящих подложек из МКМ системы Al–SiC. Для сравнения также были проведены испытания теплоотводящих оснований, изготовленных фирмой «Ceramic Process Systems» (США).

В табл. 3 представлены результаты проведенных измерений теплового сопротивления.

Таблица 3

Сравнение тепловых сопротивлений* модулей М2ТКИ-300-17КТ с различными основаниями из Al–SiC

Модуль	Условный номер ключа	R_T	R_D	Максимально допустимое значение	
				R_T	R_D
Отечественный образец	1	0,060	0,098	$\leq 0,075$	$\leq 0,11$
	2	0,051	0,0882		
Зарубежный аналог	3	0,0625	0,088		
	4	0,069	0,086		

* R_T , R_D – сопротивление транзисторного и диодного ключа.

Проведенными испытаниями установлено (см. табл. 3), что среднее значение теплового сопротивления транзисторного ключа модуля с основанием из МКМ на основе отечественного образца – на 18% ниже, чем у аналога, среднее значение теплового сопротивления диодного ключа – на 7% выше.

Также в настоящее время испытаниями на термоциклирование установлено, что после 10000 циклов на образцах не произошло отслоения металлокерамических плат (AlN с чипами) от основания. Испытания продолжаются. Параллельно проводятся натурные климатические испытания силовых полупроводниковых приборов на полигоне ГЦКИ ВИАМ (г. Геленджик).

На сегодняшний день отработана базовая технология изготовления нового материала системы Al–SiC и ведутся работы по освоению серийного производства с объемом выпуска – до 10000 изделий в год с последующим увеличением. Планируются поставки изделий системы Al–SiC как внутри страны, так и на экспорт в страны Европы, Азии и Америки (до 50%).

Экономическая эффективность применения высоконаполненного КМ обусловлена следующими факторами:

- использование недорогих отечественных исходных компонентов;
- замена дорогостоящих аналогов и материалов с ограниченным ресурсом (Mo, W, Cu);
- обеспечение уникального комплекса свойств;
- импортозамещение.

В настоящее время ведутся исследования по разработке технологии изготовления из данного материала широкой номенклатуры теплоотводящих изделий для силовой электроники и преобразовательной техники и внедрению ее на ОАО «Электровыпрямитель».

ЛИТЕРАТУРА

1. Gilleo K., Ph.D. MEMS/MOEMS Packaging Concepts, Designs, Materials, and Processes - McGraw-Hill //Nanoscience and Technology Series. 2005. 239 p.
2. Occhionero M.A., Adams R.W., Saums D. AlSiC for Optoelectronic //Thermal Management and Packaging Designs. 2001. 5 p.
3. Occhionero M.A., Fennessy K.P., Adams R.W., Sundberg G.J. AlSiC Baseplates for Power IGBT Modules: Design, Performance and Reliability //Ceramics Process Systems. 2003. 6 p.