МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЙ КОРПУС ДЛЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МОДУЛЕЙ

© А. И. Ивашко, М. М. Крымко

АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

В статье рассмотрена конструкция металлокерамического корпуса, предназначенного для мощного транзисторного полумостового модуля. Описаны критерии выбора конструкционных материалов, используемых при его изготовлении. Изложены проблемы, возникающие в процессе пайки металлических деталей корпуса к керамическому основанию, и возможные пути их решения. Обоснован выбор высокопроводящей керамики на основе нитрида алюминия в качестве материала основания.

Ключевые слова: металлокерамический корпус, керамическая плата, теплоотводящее основание, высокотемпературная пайка

Сведения об авторах: Ивашко Артём Игоревич, аспирант, ivashko_ai@pulsarnpp.ru; Крымко Михаил Миронович, к.т.н.

METAL-CERAMIC CASE FOR POWER SEMICONDUCTOR MODULES

A. I. Ivashko, M. M. Krymko

JCS «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

This paper considers the design of metal-ceramic case used in power transistor half-bridge module. The criteria for selecting case structural materials are described. Issues arising after brazing the metallic parts of the case to the ceramic base are outlined, and the possible solutions are proposed. High thermally conductive aluminum nitride ceramics is considered as a base material.

Keywords: metal-ceramic case, ceramic board, heat sink base, high-temperature brazing

Data of authors: Ivashko Artem Igorevich, postgraduate, ivashko_ai@pulsarnpp.ru; Krymko Mikhail Mironovich, Ph.D.

Введение

Корпус — важнейший элемент любого изделия силовой электроники. Его основными функциями являются: защита полупроводниковых кристаллов и других электронных компонентов от воздействий окружающей среды (загрязнений, влажности, света), негативно влияющих на параметры изделия, его надёжность и отвод тепла от теплонагруженных активных компонентов. Производством корпусов для силовых модулей и микросборок занимается целый ряд предприятий. Обычно корпуса состоят из цельного металлического основания, в боковые стенки которого впаяны выводы, изоли-

рованные керамической или стеклянной втулкой (рис. 1 и рис. 2), либо из пластины (базы) и металлического ободка, в который впаяются выводы. Типовой подход к изготовлению корпусов включает в себя следующие операции: изготовление фрезерованного металлического основания; изготовление выводов из сплава 29НК или меди и изоляторов из стекла или вакуумплотной керамики ВК-94; пайка выводов и изоляторов. В АО «НПП «Пульсар» разработан ряд силовых полупроводниковых модулей, выполненных в подобных герметичных металлокерамических корпусах [1].

Рис. 1

Металлокерамический корпус типа МК41Φ.8-2

Рис. 2

Металлокерамический корпус модуля защиты и коммутации K3002KP02

Такие конструкции силовых полупроводниковых модулей имеют ряд недостатков. Фрезерованные металлические корпуса имеют большую массу и габариты, что накладывает ограничения на их применение в аппаратуре специального назначения. Процесс сборки корпусов силовых модулей трудоёмок. Плата с электронными компонентами монтируется на основание корпуса с помощью клея или припоя, поэтому наличие переходных слоёв ухудшает тепловые характеристики изделия. Некоторые силовые модули герметизируются за счёт приклеивания крышки к корпусу, что отрицательно сказывается на надёжности изделия. В связи с этим актуальным является разработка и создание корпусов для силовых полупроводниковых модулей, обладающих меньшими габаритами и массой и улучшенными тепловыми характеристиками.

Выбор конструкционных материалов

На рис. 3 представлена конструкция разработанного металлокерамического корпуса силового полупроводникового модуля, состоящая из: 1 — основание корпуса; 2 — управляющие выводы; 3 — силовые выводы; 4 — ободок; 5 — теплоотводящий фланец; 6 — крышка.

В данной конструкции керамическая плата представляет собой основание корпуса. Для электрического контакта токопроводящих элементов модуля с выводами используются металлизированные переходные отверстия в керамическом основании (рис. 4а), что позволяет исключить из конструкции керамиче-

Рис. 3

Конструкция металлокерамического корпуса

ские (стеклянные) изоляторы выводов и снизить массу и габариты корпуса. Внешний вид корпуса представлен на рис. 4б.

При выборе материала для изготовления основания корпуса особое внимание обращалось на электрофизические характеристики, которые определяют термомеханические и теплофизические свойства корпуса. В табл. 1 приведены наиболее важные сравнительные электрофизические характеристики керамических материалов, используемых для изготовления плат в силовой электронике [2, 3].

В настоящее время широкое использование получили керамика на основе оксида алюминия, оксида бериллия, нитрида алюминия, развивается

производство плат из нитрида кремния. Керамика на основе Si_3N_4 обладает высокой механической прочностью, трещиностойкостью, термостойкостью, возможностью работы при температурах до 1400-1600°C. Прочность на изгиб составляет порядка 800 МПа, что более чем в 2 раза выше по сравнению с алюмооксидом или алюмонитридом. Технология получения керамики Si_3N_4 находится в стадии разработки, поэтому была выбрана керамика AlN , которая обладает одним из самых высоких значений теплопроводности (170-200 Вт/м·К) в ряде известных изоляционных материалов, а также экологически чистая по сравнению с керамикой BeO . Кроме того, нитрид алюминия является наи-

Рис. 4

**Керамическая плата с заполненными металлом переходными отверстиями (а);
металлокерамическое основание корпуса силового полупроводникового модуля
на основе высокотеплопроводной керамики (б)**

более подходящим конструкционным материалом для приборов и устройств на основе кремниевых кристаллов, так как ТКЛР AlN и Si практически совпадают в широком температурном диапазоне. Для получения слоя металлизации на поверхности керамики использовалась технология AMB (Active Metal Brazing) [4].

Материалы для теплоотводящих фланцев мощных полупроводниковых корпусов должны обладать максимальной теплопроводностью во всём диапазоне рабочих температур, иметь ТКЛР близкий к ТКЛР материала керамического основания, а также иметь хорошие механические свойства, исключающие деформацию фланцев как в процессе изготовления корпусов, так и при последующей сборке электрической части изделия [5]. В табл. 2

приведены характеристики материалов, применяемых для изготовления теплоотводящих фланцев силовых модулей.

При изготовлении фланцев были использованы сплавы CuW и CuMo с различным содержанием в них W и Mo, а также сплав ВМД, содержащий вольфрам, молибден и 3-5 % меди. Согласование коэффициентов термического расширения материалов корпуса достигается изменением содержания вольфрама или молибдена. Сплав MoCu обладает меньшим удельным весом. W и Mo позволяет минимизировать деформацию оснований при изготовлении корпусов и дальнейших сборочных операциях.

Для изготовления выводов, которые при дальнейших технологических операциях подвергаются высокотемпературной пайке в атмосфере водо-

Таблица 1

Основные свойства керамических материалов

Параметр	Al ₂ O ₃	BeO	AlN	Si ₃ N ₄
Теплопроводность, Вт/м·К	18-24	220-240	180-200	58
Прочность на изгиб, МПа	300-350	170-230	250-300	850
Электрическая прочность, кВ/мм	14-18	10	14-18	20
Диэлектрическая постоянная (при 1 МГц)	9-10	8	9	8,5
ТКЛР (25 °С), 10 ⁻⁶ /°С	8,0	7,8	4,6	2,7
Плотность, г/см ³	3,9	2,9	3,26	3,2

Таблица 2

Свойства материалов, применяемых для изготовления теплоотводящих фланцев силовых модулей

Исходный материал		ТКЛР ($10^{-6}/\text{K}$)	Тепло- проводность (Вт/мК)	Твёрдость (по Викерсу)	Прочность при растяжении (МПа)
Медь		19	391	80	206
Вольфрам		4,36	132	-	-
Медь Вольфрам (CuW)	10/90 (%)	7	175	300	882
	15/85 (%)	7,8	185	280	843
	25/75 (%)	9,5	230	240	686
Медь Молибден (CuMo)	40/60 (%)	9,1	230	180	608
	50/50 (%)	10,4	260	150	539
	60/40 (%)	11,3	285	130	461
ВМД		5,2	70	-	-

рода, применяют бескислородную медь (МБ) или медь вакуумной плавки (МВ). Медь, содержащая кислород, непригодна для термической обработки в атмосфере водорода, так как соединение водорода диффундирующего в медь, с растворенным в ней кислородом, делает её хрупкой. Для герметизации корпуса используется монтажное кольцо (ободок), монтируемое на лицевую сторону платы, к которому приваривается крышка. Наилучшим образом с алюминитридной керамикой по ТКЛР согласуется ковар (сплав никеля, кобальта и железа).

Детали корпуса припаиваются к основанию серебросодержащим припоем ПСр72 при температуре 850-900°C. Необходимость использования высокотемпературной пайки вызвана требованиями к качеству корпусов, а именно паяный шов должен быть монолитным, поры и воздушные включения должны отсутствовать для обеспечения минимального теплового сопротивления конструкции. Несоответствие коэффициентов линейного термического расширения керамики и металлических деталей при высокотемпературной пайке корпусов, вызывает внутренние механические напряжения. В зависимости от величины напряжений в паяном шве и керамике могут появляться трещины, которые могут проявляться непосредственно сразу после процесса пайки или во время следующих технологических операций. Трещины, вызванные механическими напряжениями в керамическом основании, прогрессируют и приводят к растрескиванию керамического основания и потере работоспособности всего устройства [6, 7]. К тому же, после пайки во время охлаждения фланца и керамики до температуры

отверждения припоя в результате термической усадки будет наблюдаться деформация теплоотводящего фланца с центральным радиусом изгиба из-за разницы коэффициентов теплового расширения материалов и большой площади соприкосновения. На рис. 5 представлены керамические платы, повреждённые в процессе пайки к теплоотводящему фланцу из-за возникновения в них механических напряжений, вызванных различием ТКЛР.

В результате эксперимента было выявлено, что замедленное остывание при пайке объектов сложной формы, содержащих детали разных масс и особенно металлокерамические узлы, способствует выравниванию температуры в местах пайки и снижению механических напряжений. Сплав МД-40 плохо согласуется с керамикой AlN ввиду различия их ТКЛР ($9,1 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ и $4,6 \cdot 10^{-6}/\text{K}$). Сплав ВМД обладает ТКЛР равным $5,2 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ и наилучшим образом согласуется с ТКЛР нитрида алюминия. Его использование для изготовления фланцев совместно с замедленным остыванием основания корпуса после пайки позволило получить согласованный спай с керамикой AlN и избежать повреждения керамических плат. Использование фланцев, изготовленных из чистого вольфрама, также позволило получить согласованный слой керамики с теплоотводом, но его применение вызывает сложности с механической обработкой.

Для эффективного отвода тепла, выделяемого активными компонентами, необходимо обеспечить минимальное тепловое сопротивление. Тепловое сопротивление конструкции зависит от применяемых материалов и геометрических размеров деталей корпуса. Для определения стационарных (во вре-

Рис. 5

Повреждённые керамические платы

мени) температурных распределений внутри конструкции корпуса, имеющего слоистую структуру, при разной толщине и разной теплопроводности слоёв была использована среда численного моделирования, основанная на методе конечных элементов, позволившая определить оптимальные сочетания применяемых конструкционных материалов. В те-

пловое сопротивление конструкции наибольший вклад вносят теплопроводность применяемых материалов и их толщина. При использовании основания из алюмооксидной керамики толщиной 1 мм и теплоотводящего фланца толщиной 1,5 мм было получено наибольшее значение теплового сопротивления ($0,86\text{ }^{\circ}\text{C/Вт}$). При использовании керамики

Рис. 6

Зависимости теплового сопротивления изделия от толщины теплоотводящего фланца для различных конфигураций керамического основания

из нитрида кремния, обладающей теплопроводностью 58 Вт/(м·К), и фланца толщиной 1 мм удалось получить тепловое сопротивление 0,48 °С/Вт. Для обеспечения мощностных характеристик изделия целесообразно использовать керамику из нитрида алюминия (AlN) толщиной 1 мм и теплоотводящий фланец на основе сплава ВМД. Применение в качестве материала основания корпуса керамики из AlN, по сравнению с керамикой из нитрида кремния, обеспечивает тепловое сопротивление 0,33 °С/Вт, что позволяет эксплуатировать изделие во всём диапазоне рабочих температур (-60 °С...125 °С). На рис. 6 приведены полученные зависимости теплового сопротивления изделия от толщины теплоотводящего фланца для различных конфигураций керамического основания.

Выводы

1. Разработан металлокерамический корпус для силовых полупроводниковых модулей на основе высокотеплопроводной керамики.
2. Решена проблема возникновения трещин в керамических платах после пайки металлических деталей корпуса путём подбора материала теплоотводящего фланца с ТКЛР близким к ТКЛР керамики.
3. Проведение пайки деталей корпуса (выводов, ободка, фланца) с керамической платой в одном технологическом процессе позволило снизить трудоёмкость производства корпусов.
4. Материал основания корпуса из керамики AlN обеспечивает эффективный отвод тепла от активных компонентов и обеспечивает тепловое сопротивление 0,33 °С/Вт.

Литература

1. Васильев А. Г., Крымко М. М. Актуальные проблемы развития требуемой номенклатуры силовых полупроводниковых приборов и модулей на их основе на ФГУП «НПП «Пульсар» // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. — 2008. — Выпуск 2.
2. Богданов Ю., Кочемасов В., Хасьянова Е. Неорганические подложки. Характеристики, критерии выбора // Печатный монтаж. — 2014. — № 1. — С. 204-216.

3. Сидоров В. Корпуса СВЧ-транзисторов на основе полиалмаза и алюмонитридной керамики // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2007. — № 4. — С. 77-79.
4. Бондарь Д. Металлические и композитные теплопроводящие материалы для мощных полупроводниковых корпусов // Компоненты и технологии. — 2014. — № 12. — С. 155-160.
5. Красный И., Непочатов Ю., Кумачёва С., Швецова Ю. Технологии изготовления плат для высокомоощных силовых полупроводниковых устройств. Часть 1 // Современная электроника. — 2014. — № 9. — С. 18-22.
6. Петрунин И. Е. Справочник по пайке. — М.: Машиностроение, 2003. — 360 с.
7. Петрунин И. Е., Маркова И. Ю., Екатова А. С. Металловедение пайки. — М.: Металлургия, 1976. — 210 с.

References

1. Vasilyev A. G., Krymko M. M. Actual problems of development of the required power semiconductor devices and modules at S&PE Pulsar. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2008, № 2.
2. Bogdanov Yu., Kochemasov V., Khasyanova E. Inorganic substrates. Characteristics, selection criteria. *Pechatny montazh* [Printed wiring], 2014, № 1, pp. 204-216.
3. Sidorov V. Microwave transistor cases based on polyamide and aluminous nitride ceramics. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*. [Electronics: Science, Technology, Business], 2007, № 4, pp. 77-79.
4. Bondar D. Metallic and composite thermally conductive materials for power semiconductor cases. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technology], 2014, № 12, pp. 155-160.
5. Krasnyi I., Nepochatov Yu., Kumacheva S., Shvetsova Yu. Technologies of printed circuit boards manufacturing for high-power semiconductor applications. Part 1. *Sovremennaya elektronika* [Modern electronics], 2014, № 9, pp. 18-22.
6. Petrunin I. E. *Brazing Guide*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 360 p.
7. Petrunin I. E., Markova I. Yu., Ekatoa A. S. *Brazing Metallurgy*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 210 p.