

Металлические и композитные теплопроводящие материалы для мощных полупроводниковых корпусов

Дмитрий БОДНАРЬ,
к. т. н.
bodnar@syntezmicro.ru

В статье рассмотрены основные требования и критерии выбора теплопроводящих материалов мощных полупроводниковых корпусов, основные тепловые и электрофизические параметры сплавов WCu, MoCu, композитных материалов из Cu, Mo, WCu, MoCu и новых перспективных композитных материалов алюминий-алмаз, медь-алмаз, CVD-графит, использующих ключевые электрофизические параметры углерода. Проанализировано влияние типа теплопроводящих материалов оснований корпусов на тепловые и электрические параметры мощных СВЧ-транзисторов.

Введение

Одной из тенденций современных эффективных полупроводниковых приборов является увеличение плотности выделяемой мощности, достигающей десятков кВт/см², и повышение рабочей температуры приборов [1]. Использование новых материалов, таких как SiC, GaN, позволяет увеличить рабочие температуры с типовых +85...150 °C до экстремальных +250...300 °C и выше [2]. Даже при +125...150 °C высокая температура может стать одной из основных причин отказа полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. При экстремальных температурах отвод тепла от поверхности чипа и корпуса прибора превращается в первоочередную проблему, требующую решения. И здесь на помощь приходит оптимизация конструкции и технологии сборки, а также применение новых материалов с улучшенными теплопроводящими свойствами [3].

В силовых приборах, действующих на низких частотах или в постоянном режиме, могут быть использованы все методы оптимизации. Однако в мощных ВЧ- и СВЧ-транзисторах и усилителях мощности ее возможности ограничены из-за паразитных составляющих, влияющих на работу при высоких и сверхвысоких частотах. Применение новых материалов с улучшенными теплопроводящими свойствами часто остается единственным приемлемым способом отвода тепла от поверхности чипа. Поэтому в последние годы множество исследований и разработок, особенно в США и Японии, посвящено именно созданию новых материалов для мощных полупроводниковых корпусов.

На рис. 1 показана типовая структура и материалы современного мощного мультичипового СВЧ LDMOS-транзистора и усилителя мощности. Базовым в такой конструкции является металлическое основание, на которое методом высокотемпературной напайки монтируются боковая керамиче-

ская рамка из Al₂O₃, металлические выводы, а также с помощью эпоксидного компаунда наклеивается керамическая крышка. Чипы транзисторов и конденсаторов монтируются на металлическое теплопроводящее основание методами эвтектики Au-Si или посадкой на припой. В СВЧ MOSFET- и биполярных транзисторах монтаж чипа выполняется на металлизированную BeO- или AlN-керамику, расположенную между металлическим основанием и чипом и электрически изолирующую чип от основания. В процессе эксплуатации температура достигает максимальных значений на поверхности чипа и за счет хороших теплопроводящих свойств BeO-керамики и металлического основания уменьшается к области нижнего основания корпуса (рис. 2) [4]. Керамика BeO обладает лучшими теплопроводящими свойствами из известных применяемых материалов (рис. 3) и является безальтернативной для СВЧ-транзисторов и модулей высокой мощности. Снижение толщины чипов также становится одним из факторов уменьшения температуры на поверхности чипа [5]. Однако особое значение имеют тепловые и электрофизические параметры металлических оснований мощных полупроводниковых корпусов. Именно от них зависит эффективность отвода тепла от чипа к внешним радиаторам.

Критерии выбора материалов

Выбор материалов для теплоотводящих оснований (фланцев) мощных полупроводниковых корпусов обусловлен соответствием основным параметрам, которыми должны обладать эти материалы:

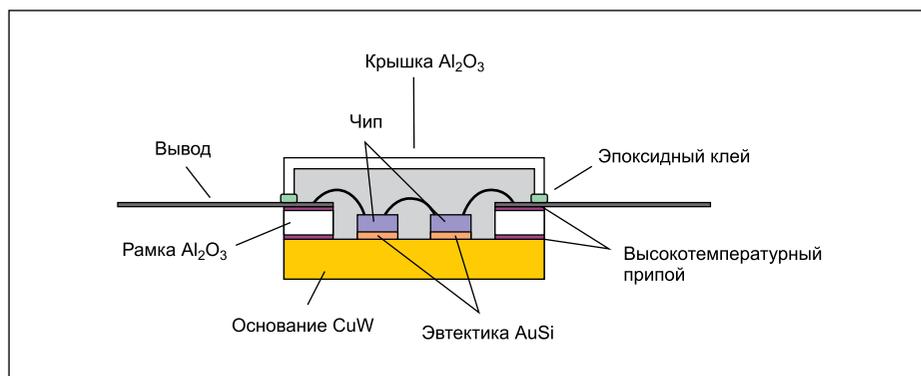


Рис. 1. Типовая структура мощного СВЧ LDMOS-транзистора в корпусе

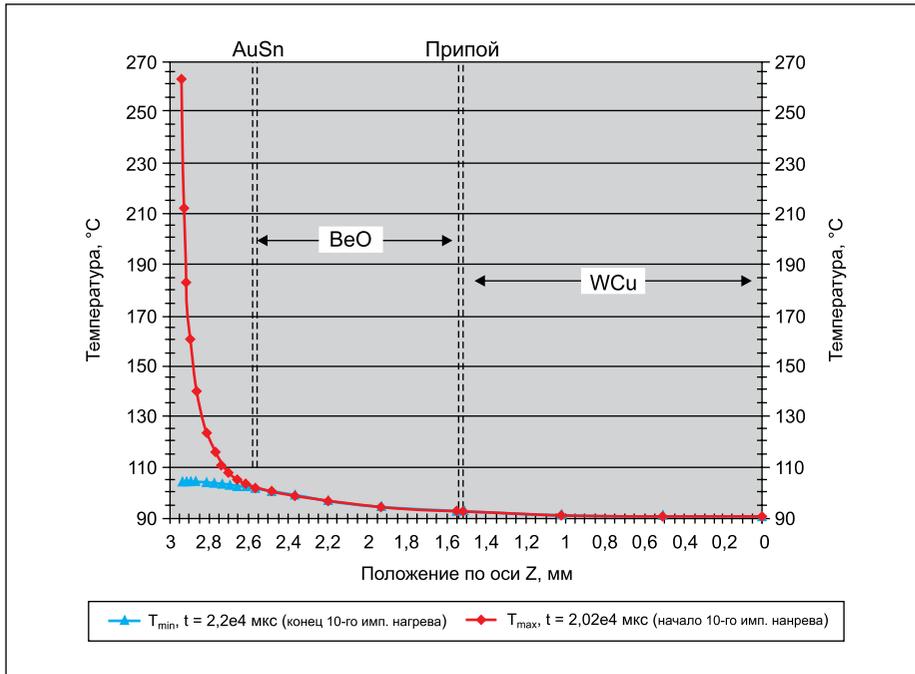


Рис. 2. Распределение температуры в структуре мощного СВЧ-транзистора

- максимальная теплопроводность во всем диапазоне рабочих температур;
- технологическая совместимость с основными материалами корпуса (ковар, Cu, Al_2O_3 , BeO, AlN и др.) и материалами чипов (Si, GaAs, GaN, InP, SiC и т.д.);
- коэффициент термического расширения (КТР), максимально близкий к основным материалам корпуса и чипа;
- хорошие механические свойства, исключающие деформацию оснований как в процессе изготовления корпусов, так и при сборке чипов и последующей эксплуатации;
- низкая шероховатость поверхности, менее 0,6 мкм;

- приемлемая стоимость.

На рис. 4 приведены теплопроводность и коэффициент термического расширения для основных материалов, применяемых при изготовлении корпусов и чипов для приборов силовой и СВЧ-электроники [6]. Видно, что коэффициент термического расширения основных материалов находится в области 4–8 ppm/K. Медь, как наиболее распространенный материал для мало-мощных корпусов ИС, имеет достаточную теплопроводность, но довольно высокий КТР. Сочетание хорошей теплопроводности Cu с удовлетворительными КТР широко применяемых в микроэлектронике W

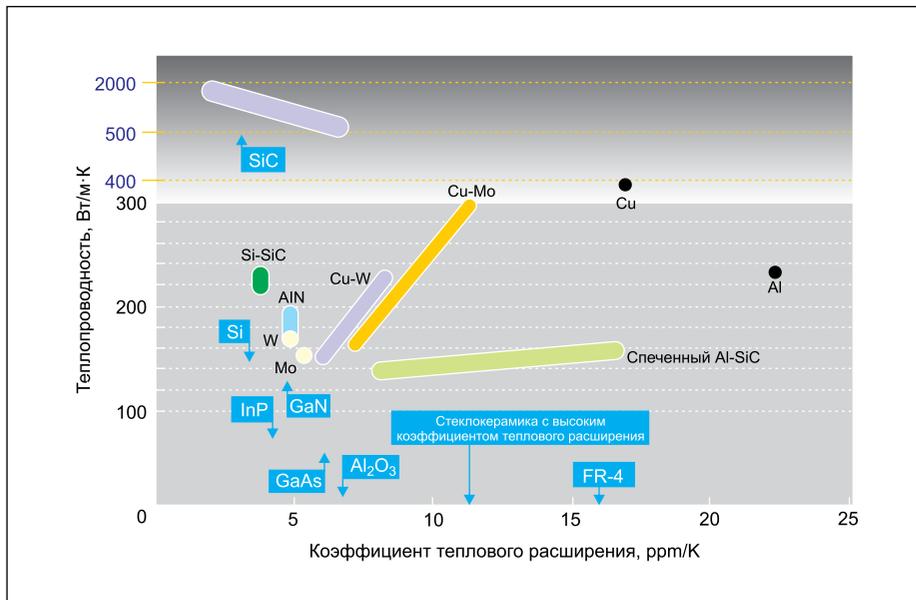


Рис. 4. Теплопроводность и коэффициент термического расширения основных материалов силовой и СВЧ-электроники

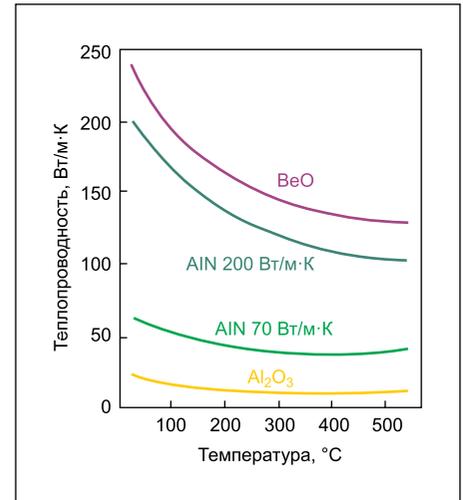


Рис. 3. Тепловые свойства различных керамических материалов

и Mo становится оптимальным выбором материала сплавов WCu и MoCu для теплопроводящих оснований корпусов мощных приборов. В настоящее время именно этим обусловлено широкое распространение WCu и MoCu в качестве материалов теплопроводящих оснований для корпусов мощных выпрямительных и лазерных диодов, СВЧ-транзисторов и усилителей мощности, а также мощных силовых модулей и оптоэлектронных приборов.

Материалы WCu, MoCu

Требование совместимости КТР основных материалов корпуса и чипов обуславливает повышенное содержание W и Mo в сравнении с Cu в сплавах WCu и MoCu. В таблице 1 представлены параметры WCu и MoCu в зависимости от содержания в них W и Mo [7]. Изменяя содержание W, можно достигать близости коэффициентов термического расширения к основным применяемым материалам: кремнию, керамике Al_2O_3 , BeO, AlN и металлам (ковар и др.). Идентичный результат удается получить за счет изменения содержания Mo в сплаве MoCu, однако благодаря меньшему весу MoCu имеет преимущество в тех областях, где это особенно важно, прежде всего в авиационной и космической сферах. Хорошая механическая прочность

Таблица 1. Параметры сплавов WCu и MoCu в зависимости от соотношения материалов

Тип	Содержание W и Mo, вес. %	Плотность, г/см ³	Коэффициент термического расширения, ppm/K	Теплопроводность, Вт/м·К
W90Cu	90 ± 1	17	6,5	180–190
W85Cu	85 ± 1	16,3	7	190–200
W80Cu	80 ± 1	15,6	8,3	200–210
W75Cu	75 ± 1	14,9	9	220–230
Mo70Cu	70 ± 1	9,8	9,1	170–200
Mo60Cu	60 ± 1	9,66	10,3	210–250
Mo50Cu	50 ± 1	9,54	11,5	230–270

W и Mo позволяет минимизировать деформацию оснований при изготовлении корпусов и сборке чипов.

Технологии получения и обработки сплавов WCu и MoCu давно созданы и оптимизированы. Бурное промышленное развитие в Китае способствовало организации таких производств в этой стране и снижению их цены. Вот почему простым сплавам WCu, MoCu в данной статье уделено меньше внимания, чем альтернативным материалам с улучшенными параметрами.

Композиционные материалы

В последние годы широкое распространение получают слоистые композиционные структуры. Они состоят из нижней и верхней обкладок из Cu, между которыми помещается слой, содержащий Mo или W или их сплавы с медью (рис. 5). Меняя соотношение толщины данных слоев, можно варьировать теплопроводность и коэффициент термического расширения (табл. 2) [7, 8]. Такие «сэндвичные» структуры позволяют не только увеличить теплопроводность и жесткость конструкции, но и снизить их стоимость, что имеет немалое значение для повышения конкурентоспособности.

На рис. 6 дано сравнение механических напряжений в материалах WCu и медном композите, демонстрирующее значительно меньшие напряжения и склонность к деформации в композиционных структурах. Это имеет особое значение для сверхмощных приборов, использующих основания (фланцы) большой площади. В таких приборах нарушение плоскостности основания корпуса способно привести к катастрофическим отказам при эксплуатации.

Количество слоев в композиционных структурах может изменяться от трех для простых СМС-, СРС-материалов до 8–10, как в S-СМС-материалах.

В настоящее время композиционные структуры из Cu, W, Mo, имеющие улучшенные параметры в сравнении со сплавами WCu, MoCu, вытесняют их, расширяя сферы своего применения.

Металлические материалы с графитовым наполнением

Совсем недавно появились разновидности композитных материалов, использующих в качестве внутреннего наполнения «сэндвича» графитовый материал (рис. 7) [9]. Разработанный компанией Momentive Performance Materials графитовый материал под названием TPG (thermal pyrolytic graphite) изготавливают в вакууме при температуре свыше +2000 °C методом осаждения из газовой фазы с помощью разложения CH₄. Полученный TPG обладает слоистой структурой с хорошо ориентированными кристаллами, теплопроводностью 1500 Вт/м·К, что в четыре раза выше, чем у Cu. Кроме того, данный материал даже легче алюминия и WCu и MoCu. Благодаря прекрасным тепловым параметрам он обеспечивает ми-

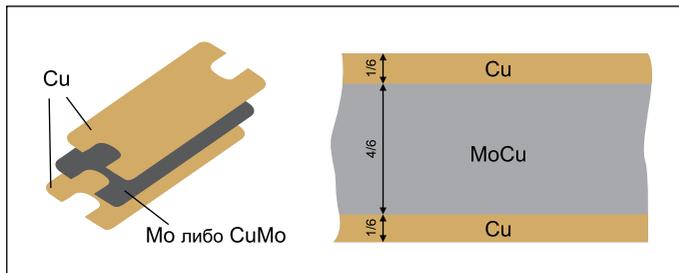


Рис. 5. Вид и структура композиционных оснований СВЧ-корпуса

Таблица 2. Параметры композиционных структур СМС (Cu/Mo/Cu) и СРС (Cu/Mo70Cu/Cu) в зависимости от соотношения материалов

Тип	Соотношение	Плотность, г/см ³	Коэффициент термического расширения, ppm/°K	Теплопроводность, Вт/м·К	
				в плоскости	по толщине
СМС (Cu/Mo/Cu)	13:74:13	9,88	5,6	200	170
	1:4:1	9,75	6	220	180
	1:3:1	9,66	6,8	244	190
	1:2:1	9,54	7,8	260	210
	1:1:1	9,32	8,8	305	250
СРС (Cu/Mo70Cu/Cu)	1:4:1	9,46	7,2 — по оси X 9 — по оси Y	340	300
СРС (Cu/W85Cu/Cu)	1:4:1	13,45	8,79	340	300
S-СМС (Cu/Mo/Cu/.../Cu)	5:1:5:1:5	9,2	12,8 при +200 °C 6,1 при +800 °C	350	295

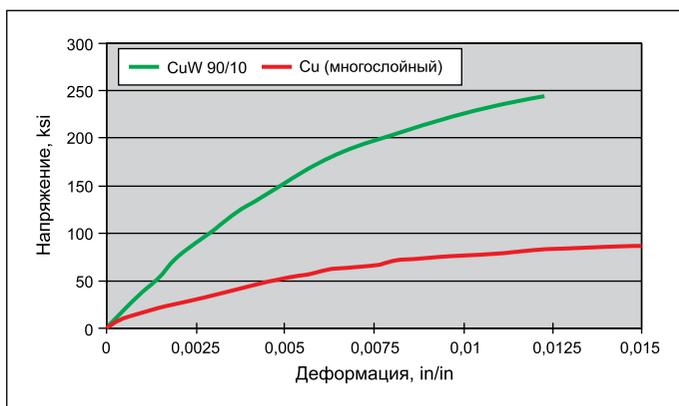


Рис. 6. Механические напряжения WCu- и Cu-композита

нимальный градиент температур и значительное повышение рассеиваемой мощности (рис. 8, 9). Исследования, проведенные нашей компанией «Синтез Микроэлектроника» на TPG-основаниях

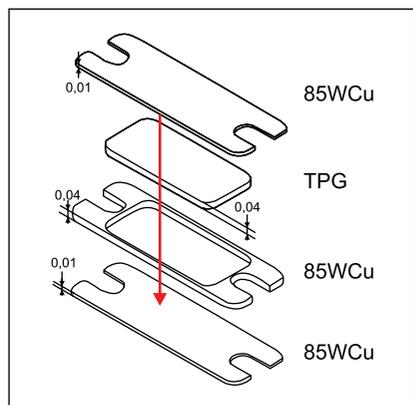


Рис. 7. Структура графитовых TPG-оснований СВЧ-корпуса

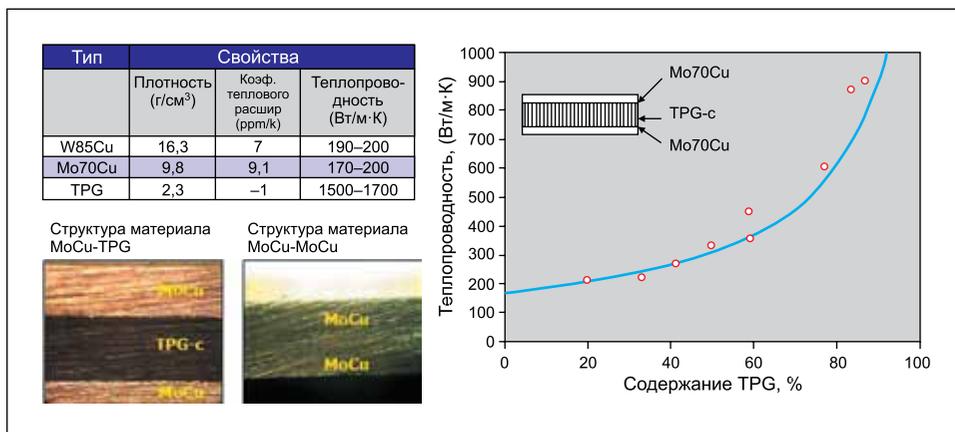


Рис. 8. Параметры материалов TPG, MoCu, WCu

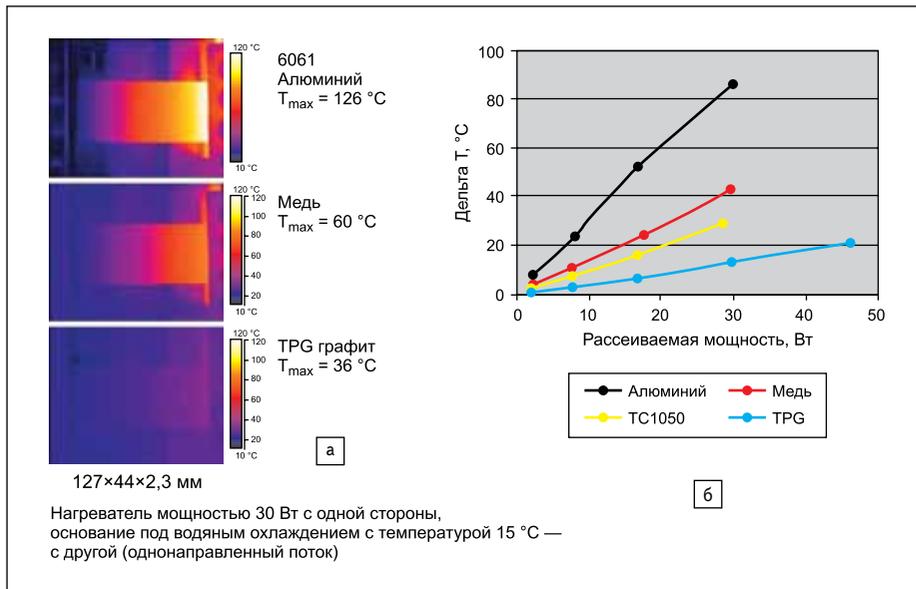


Рис. 9. Тепловые преимущества TPG-материала:
а) корпус с основанием CuMo (толщина транзисторного чипа $d = 220\text{ мкм}$);
б) корпус с основанием TPG (толщина транзисторного чипа $d = 220\text{ мкм}$)

компании Momentive, показали отличные результаты.

На рис. 10 приведены результаты распределения теплового поля и достигнутых параметров мощности и теплового сопротивления для СВЧ-транзистора в корпусах с основаниями из MoCu и с графитовым TPG-наполнителем. Это означает, что применение TPG позволяет снизить тепловое сопротивление переход-корпус на 30% и, соответственно, пропорционально увеличить значение максимальной рассеиваемой мощности (рабочего тока) и расширить область безопасности работы транзистора.

Однако, несмотря на хорошие тепловые, механические и физические свойства, в настоящее время структуры TPG обладают одним существенным недостатком — высокой стоимостью. Очевидно, что в даль-

нейшем по мере удешевления технологии TPG-материал расширит сферы применения в полупроводниковых корпусах, особенно для высокотемпературного, экстремального и сверхмощного применения.

В работе [10] было исследовано использование и влияние CVD-алмаза для мощных СВЧ-корпусов на тепловые параметры СВЧ-транзистора и усилителя мощности. Промоделировано влияние CVD-алмаза толщиной 0,3 мм, нанесенного на поверхность основания MoCu вместо керамики BeO, на тепловые параметры этих приборов. Установлено, что температура может быть снижена на 5 °С, а тепловое сопротивление уменьшено на 30%. Данные расчеты очень хорошо согласуются с упомянутыми экспериментальными результатами на TPG-основаниях, полученными нашей компанией.

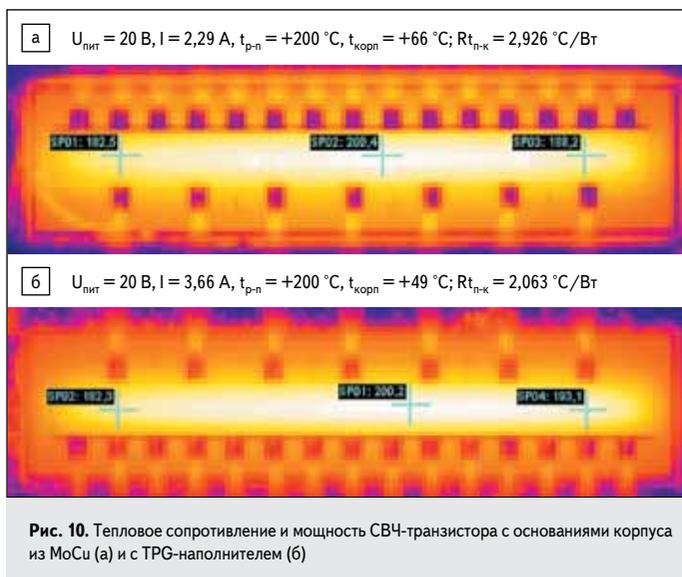


Рис. 10. Тепловое сопротивление и мощность СВЧ-транзистора с основаниями корпуса из MoCu (а) и с TPG-наполнителем (б)

Алюминий-алмаз, медь-алмаз

Еще одно направление, использующее хорошие параметры углерода, — композитные материалы Al-алмаз и Cu-алмаз. Исследования их свойств велись более 10 лет, но только недавно эти материалы стали коммерчески доступными для продуктов силовой электроники.

Компания Nano Materials International Corporation (NMIC) много лет проводит исследование по материалу алюминий-алмаз [11]. И лишь в 2011 году NMIC анонсировала выход на рынок GaN СВЧ мощных транзисторов первого теплопроводящего материала из материала алюминий-алмаз. Схема процесса получения металлического матричного композитного материала, известного MMC (Metal Matrix Composite), показана на рис. 11.

Материалы компании NMIC производятся по процессу, называемому «литье под давлением», предусматривающему инфильтрацию при высоком давлении (50–150 МПа) расплавленного алюминия или алюминиевого сплава в оснастку, содержащую алмазный порошок со сформированным поверхностным слоем SiC [11]. Оснастка представляет собой формованные пластины различного размера и толщины под конкретные габариты изделий каждого клиента. В процессе жидкой штамповки расплавленный металл под высоким механическим давлением заполняет герметичную матрицу с оснасткой. Давление в данном процессе выше, чем в других процессах типа инфильтрации с использованием давления газа, за счет чего достигаются лучшие показатели теплопроводности. Кроме того, в отличие от других процессов литье под давлением делает композиты с металлической матрицей (MMC) более твердыми и однородными. Композиционные материалы обычно состоят из базового металла (металлического сплава типа алюминия, меди или кремния) в сочетании с вторичным

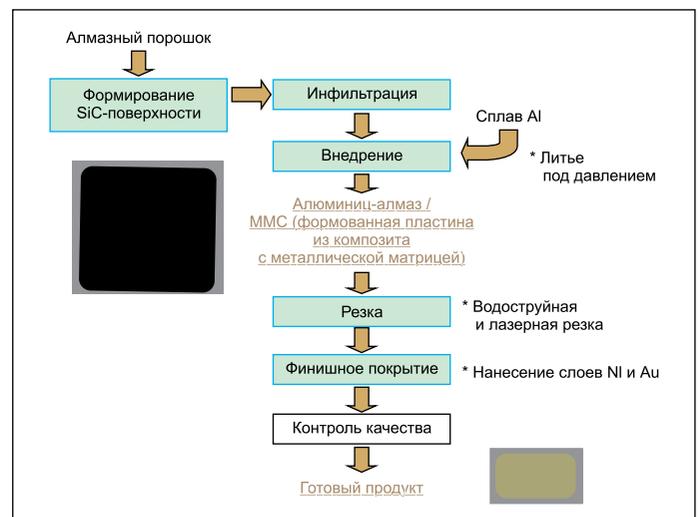


Рис. 11. Схема процесса изготовления материала Al-алмаз

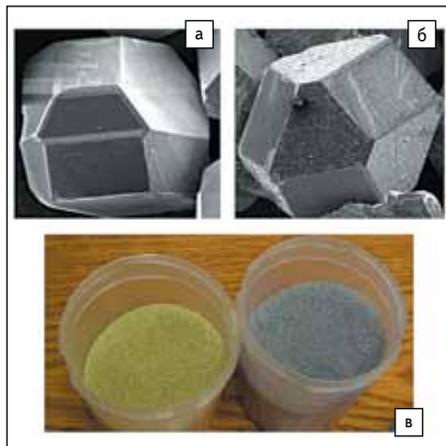


Рис. 12. Частицы алмаза:
а, б) фото с электронного микроскопа:
а) без преобразованного поверхностного слоя;
б) с преобразованным поверхностным SiC-слоем;
в) внешний вид

материалом типа алмаза или SiC. Композиты с металлической матрицей (ММС) используют комбинацию из алюминиевого сплава, инфильтрованную в преформу или упаковку из частиц алмаза, представляющих собой дешевый промышленный порошок из синтетических алмазов. Размер и соотношение алмазных частиц оптимизируется для получения высокой теплопроводности, низкого КТР и удовлетворительной механической прочности. Готовится смесь из двух размеров алмазных частиц (мелких и крупных) для максимизации нагрузки, типовое значение которой составляет 60 об.% алмазного порошка. Испытания показали, что интерфейс между алмазными частицами и инфильтрованным алюминиевым сплавом имеет особую важность для обеспечения общей теплопроводности и термостабильности ММС. Неспособность алюминия полностью смачивать частицы алмаза приводит к возникновению микротрещин в данной прослойке, результатом чего является деградация параметров теплопроводности (поскольку данная прослойка играет основную роль во взаимодействии между металлом и алмазом). При термоциклировании микротрещины вызывают разрушение прослойки, что приводит к уменьшению теплопроводности. С учетом всего этого компания NMIC разработала процесс создания методами диффузии тонкого поверхностного слоя SiC на поверхности частиц алмаза. В отличие от покрытия SiC, которое представляет собой еще один лишний термоинтерфейс между слоем SiC и частицами алмаза, преобразованный поверхностный слой SiC становится неотъемлемой составляющей самой частицы алмаза и устраняет значительные потери в теплопроводности до поверхности алмаза. К тому же преобразованный слой на поверхности алмаза в сочетании с металлической матрицей, обеспечивающей хорошую меха-

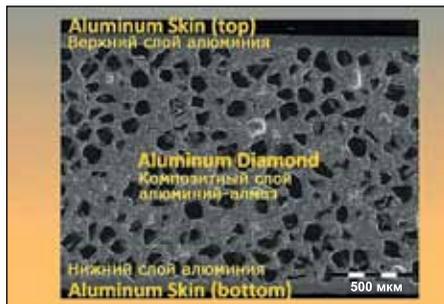


Рис. 13. Структура материала Al-алмаз

ническую прочность и жесткость, дает максимальные теоретически возможные уровни теплопроводности для подобных композитов, а также полную смачиваемость частиц алмаза алюминием за счет поверхностного слоя SiC и отсутствие микротрещин в прослойке. На рис. 12 показано фото со сканирующего электронного микроскопа частиц алмаза с преобразованным поверхностным слоем SiC и без него. На рис. 12 видно значительное изменение цвета алмазного порошка после формирования на нем данного слоя. Были проведены испытания по термотренировке образцов, изготовленных с использованием алмазов с поверхностным слоем SiC и без такового. После 10 циклов термотренировки при +500 °C с интервалом в 1 ч удельная теплопроводность образцов без поверхностного слоя SiC быстро деградировала, в то время как теплопроводность образцов с поверхностным слоем SiC оставалась неизменной. Тест продемонстрировал важность наличия поверхности контакта между металлом и алмазом и ту роль, которую играет сформированный поверхностный слой SiC в поддержании стабильных параметров теплопроводности.

Шероховатость (гладкость) поверхности основания корпуса очень важна для обеспечения качественного монтажа чипов на его поверхности. Типовое требование шероховатости составляет менее 1 мкм. Для того чтобы создать нужную поверхность материала Al-алмаз, на его нижней и верхней стороне формируют слои алюминия толщиной от 0,05 до 0,1 мм (рис. 13). Таким образом достигается поверхность шероховатость

Таблица 3. Параметры материалов Al-алмаз, Cu-алмаз

Параметры	Al-алмаз	Cu-алмаз
Содержание алмаза, об.%	57	—
Плотность, г/см ³	3,17	5,5
Теплопроводность, Вт/м·К	500	470
Удельная теплоемкость, Дж/г·К	0,62	0,44
Коэффициент термического расширения, ppm/К	7,5	6,7
Прочность изгиба, МПа	300	230
Модуль Юнга, ГПа	340	255
Электрическое сопротивление, мкОм·см	37	9
Шероховатость поверхности (Ra), мкм	<1	<2
<0,2 покрытая		
Точка плавления, °C	+570	—

менее 0,6 мкм. Наличие этих слоев необходимо и для последующего формирования на их поверхности слоев Ni и Au (рис. 11).

Композитный состав Cu-алмаз очень близок по своим характеристикам к параметрам Al-алмаз (табл. 3) [8]. Он получил промышленное продвижение из-за предпочтительных свойств и преимуществ меди для корпусного применения и совместимости с другими материалами электроники.

Основные параметры материала Al-алмаз приведены в таблице 3. Материал обладает теплопроводностью 500 Вт/м·К, что более чем в 2 раза превышает эти значения для WCu. Моделирование, выполненное на мощных GaN-транзисторах, показало снижение теплового сопротивления переход-корпус на 25%. Исследование влияния температуры на теплопроводность и КТР образцов Al-алмаз демонстрирует увеличение КТР вплоть до +400 °C с последующим выравниванием значений (рис. 14). Это вполне ожидаемо из-за приближения температуры к точке плавления Al-сплава. Теплопроводность материала уменьшается с повышением температуры.

Американская компания Metal Matrix Cast Composites (MMCC) специализируется на разработке материалов и компонентов для полупроводниковой, военной, авиационной, медицинской промышленности [12]. Одной из сфер применения этих материалов являются композитные материалы с высокой теплопроводностью. Запатентованные MMCC технологии производства Al- и Cu-композитных материалов позволили выпустить на рынок продукты METGRAF и AlGrp. Линейка METGRAF включает AlMetGraf-

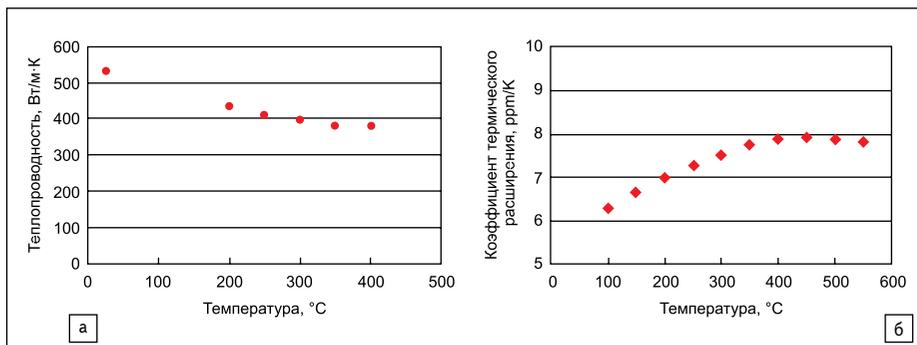


Рис. 14. Влияние температуры на теплопроводность и коэффициент термического расширения материала Al-алмаз

и CuMetGraf-композитные составы из Al и Cu с углеродом, обладающие теплопроводностью от 185 до 300 Вт/м·К. Материал AlGrp имеет более высокую теплопроводность 650–750 Вт/м·К, что позволяет применять его и в качестве вставок в основания из METGRAF, тем самым повышая его теплопроводность (рис. 15) [12].

Применение в полупроводниковой электронике

Достижимое с помощью углеродных составляющих металлов корпусов улучшение тепловых и электрических параметров мощных полупроводниковых приборов весьма важно для дальнейшего увеличения плотности их мощности. Однако таким материалам еще предстоит пройти путь адаптации к массовому промышленному применению, включая оптимизацию технологии, обеспечение полной воспроизводимости параметров и приемлемой цены для рынка. Это позволит не только захватить рыночную нишу экстремального применения и сверхмощных приборов, но и потеснить сплавы металлов WCu, MoCu и композиционные структуры в уже существующих сферах.

Материалы повышенной теплопроводности используются не только для СВЧ-корпусов, но и для корпусов обычных мощных диодов и транзисторов. В 1990-е годы компания AEGIS (сейчас AMETEK) разработала серию корпусов TO и SMD. В качестве их базовых оснований, наряду с коваром и Cu, применялись сплавы WCu и MoCu, а в последнее время и AlSiC [13]. Сейчас корпуса TO-254, TO-256, TO-257, TO-258, SMD-0.5, SMD-1, SMD-2, в составе которых имеются эти материалы, изготавливает несколько компаний в США, Европе, Азии и России. В зависимости от поставленных задач заказчик может приобрести корпуса не только с разным материалом базового основания, но и с металлизированной керамикой из BeO или AlN, что необходимо для MOSFET-транзисторов. В таких корпусах компании Microsemi и GeneSiC Semiconductor [14, 15] выпускают много изделий.

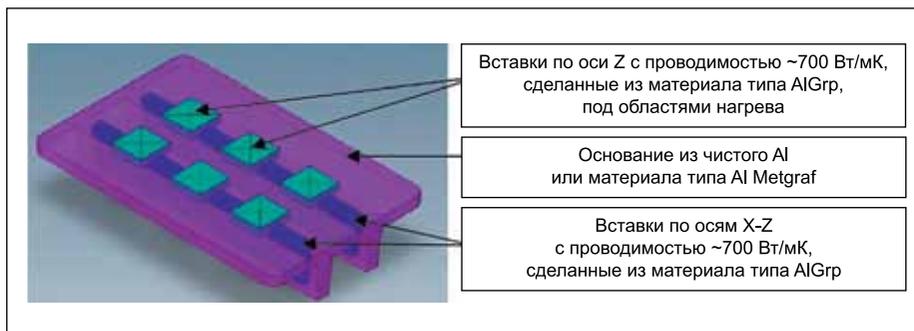


Рис. 15. Пример конструкции с комбинированием материалов METGRAF и AlGrp компании MMCC

Но наиболее привлекательны эти материалы для металлокерамических и пластмассовых корпусов СВЧ-транзисторов и усилителей мощности, чья выходная мощность достигает 2,2 кВт [14] за счет новых материалов типов GaN, SiC.

Очевидно, что по мере увеличения мощности и рабочей температуры полупроводниковых приборов роль и использование новых материалов с высокой теплопроводностью будет возрастать. Это станет основным стимулом не только для максимального сокращения сроков перехода от исследований новых материалов к их промышленному применению, но и к созданию новых перспективных материалов с улучшенными параметрами.

Заключение

Повышение максимальной мощности современных эффективных полупроводниковых приборов требует действенных методов и материалов для отвода тепла от поверхности чипа.

Металлические основания с максимальной теплопроводностью становятся наиболее эффективным инструментом для снижения температуры мощных полупроводниковых корпусов.

В настоящее время WCu и MoCu являются основными коммерческими материалами основания корпусов, позволяющими за счет изменения соотношения между WCu

и MoCu варьировать теплопроводность и коэффициент термического расширения для конкретных целей.

Композиционные структуры Cu/MoCu/Cu, Cu/WCu/Cu, Cu/Mo/Cu/.../Cu в 1,2–1,4 раза способны улучшить теплопроводность типовых WCu-, MoCu-материалов и повысить их устойчивость к механическим деформациям.

Благодаря исключительным параметрам углерода его использование в композитных структурах алюминий-алмаз, медь-алмаз и в композитных материалах значительно улучшает теплопроводящие свойства мощных полупроводниковых корпусов и увеличивает мощность СВЧ-транзисторов, усилителей мощности, лазерных диодов и т. д. Однако массовое промышленное применение этих перспективных материалов пока сдерживается сложностью технологии и их высокой стоимостью. ■

Литература

1. Blanchard P. RF & Microwave Capability & Roadmap. Microsemi Space Forum Russia. November, 2013.
2. Sundaresan S, Singh R., Johnson R. W. Silicon Carbide Super Junction Transistors Operations at 500 °C // www.genesicsemi.com
3. Zweben C. Transient Thermal Solve Power Electronics Challenges. Power Electronics Technology. February, 2006.
4. Eblen M. Transient Thermal Modeling Techniques for WBG Device Packaging. Kyocera America. 2006.
5. Боднар Д. Ультратонкие пластины как тенденция развития полупроводниковых технологий // Компоненты и технологии. 2012. № 11.
6. www.allied-material.co.jp
7. Torrey Hills Heat Sinks. 2013 // www.torreyhillstech.com
8. www.plansee.com
9. www.momentive.com
10. Obeloer T., Bolinger B. E. CVD Diamond — Integrating a Superior Thermal Material. Electronics Cooling. September 5, 2014.
11. Loutfy K., Hirotsuru H. Advanced Diamond Metal Matrix Composites for Thermal Management of RF Devices.
12. www.metalmatrixcomposites.com
13. www.ametek-ecp.com
14. www.microsemi.com
15. www.genesicsemi.com