

КОРПУСА СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ

НА ОСНОВЕ ПОЛИАЛМАЗА И АЛЮМОНИТРИДНОЙ КЕРАМИКИ

Эффективность и тактико-технические характеристики современных систем связи, радиолокационных систем, приемопередающих устройств СВЧ- и КВЧ-диапазонов, а также и других средств радиоэлектронного вооружения непосредственно зависят от используемых в них мощных СВЧ-транзисторов. В свою очередь параметры и надежность этих приборов зависят от диэлектрических свойств и теплопроводности материалов теплоотводящих конструктивных элементов, предназначенных для монтажа полупроводниковых структур. В корпусах мощных СВЧ-транзисторов эти элементы, в основном, выполняют из керамики на основе оксида бериллия (BeO).

Важнейший элемент практически любого транзистора – его корпус. Он должен удовлетворять требованиям, предъявляемым к конструкции прибора, его назначению, стойкости к воздействию внешних факторов, в том числе и специальных, и иным требованиям надежности. Кроме того, корпус должен быть устойчив к технологическим режимам сборки транзистора. Как правило, корпус мощного СВЧ-транзистора содержит металлический теплоотводящий фланец, на котором размещены изолятор из многослойной алюмооксидной керамики с присоединенными к нему плоскими внешними выводами и теплоотвод из диэлектрического материала с высокой теплопроводностью (рис.1). Все детали соединяются высокотемпературной пайкой серебром или эвтектическим припоем серебро-медь. Кремниевые кристаллы с транзисторными структурами монтируют на металлизированную поверхность теплоотвода. Корпус герметично закрыт керамической крышкой с помощью клея или припоя.

Фланец может выполняться из меди, псевдосплава молибдена с медью, вольфрама с медью и т.п. Традиционный материал теплоотвода – BeO-керамика, характеризующейся малыми диэлектрическими потерями в СВЧ-диапазоне частот

В.Сидоров

и высокой теплопроводностью. Вместе с тем, производство BeO-керамики чрезвычайно токсично. Разработчики и предприятия-изготовители мощных СВЧ-транзисторов на протяжении десятков лет ищут экологически чистые материалы с требуемыми диэлектрическими свойствами и теплопроводностью, альтернативные BeO-керамике. В Одесском Государственном университете велись работы по получению алмазной керамики, исследовались возможности применения сфалеритоподобного нитрида бора, разработанного Киевским институтом сверхтвердых материалов. По ряду объективных причин (алмазная керамика пористая и недостаточно теплопроводная, а из нитрида бора, отличающегося очень высокой твердостью, не удалось получить изделия заданной формы и размеров) такие материалы не нашли применения при производстве корпусов для транзисторов. Сейчас наиболее перспективными представляются высокотеплопроводные поликристаллический алмаз (полиалмаз) и керамика на основе нитрида алюминия (AlN). Определенные успехи по использованию теплоотводов на основе этих материалов в корпусах СВЧ-транзисторов достигнуты в ФГУП "НПП "Пульсар".

С начала 80-х годов в ФГУП НПП "Пульсар" проведен комплекс работ по исследованию возможности использования AlN-керамики в корпусах полупроводниковых приборов. По коэффициенту теплового расширения этот материал хорошо согласуется с кремнием (табл.1), что особенно важно для приборов, выполненных на кристаллах больших размеров. К тому же, в отличие от BeO-керамики теплопроводность AlN-керамики не уменьшается при нагреве транзистора. Результаты исследований подтвердили возможность использования AlN-керамики в корпусах мощных приборов. В 1997 году в корпусах с AlN-керамикой были изготовлены работоспособные мощные МДП-транзисторы типа 2П941Б с рабочей частотой 1,0 МГц, а в 2004-м – импульсные транзисторы S-диапазона типа А880В с выходной мощностью 18–20 Вт. По своим энергетическим параметрам эти приборы не уступали серийным транзисторам в корпусах с теплоотводом на основе оксида бериллия.

Для сборки корпуса с помощью высокотемпературной пайки припоем на основе серебра потребовалось разработать

процесс металлизации AlN-керамики. Теоретические и экспериментальные исследования показали возможность металлизации AlN-керамики пастами на основе тугоплавких металлов, а также вакуумным осаждением металлов и активной пайкой металлической фольги. При металлизации путем высокотемпературного вжигания пасты из-за склонности AlN-керамики к превращению в оксид алюминия очень важно соблюдать температурные режимы и требования к составу среды. Повышению адгезии пасты способствует предварительное окисление тончайшего слоя AlN-керамики.

При вакуумном осаждении металлов наиболее предпочтительна система металлизации, химически взаимодействующая с материалом подложки. Чтобы между напыляемым металлом и материалом диэлектрика протекала химическая реакция, необходимо обеспечить ее возможность с точки зрения термодинамики [4]. Показано, что хорошая адгезия металлизации к AlN-керамике может быть получена при вакуумном осаждении титана в качестве первого слоя.

Полиалмаз, не уступая по СВЧ-свойствам BeO-керамике, почти на порядок превосходит ее по теплопроводности. Вот почему применение его в корпусах мощных СВЧ-транзисторов должно дать ощутимый положительный эффект. Компании Hughes, Norden, Varian, NEC, Siemens и другие. в качестве теплоотводов корпусов микроминиатюрных лавинно-пролетных диодов (ЛПД) миллиметрового диапазона используют природные алмазы небольших размеров (~1×1×0,3 мм). Однако стоимость природных алмазов велика, а размеры их малы. Ряд зарубежных фирм и российских предприятий ведут работы по получению больших пластин полиалмаза, превосходящих по теплопроводности BeO-керамику в пять-десять раз и обладающих высокими диэлектрическими свойствами. Так, в ИОФ РАН и АО "Дигазкрон" освоена техника выращивания алмазных пластин толщиной до 1,5 мм и диаметром до 65 мм в плазмохимическом реакторе на основе СВЧ-разряда (мощность 5 кВт, частота 2,45 ГГц). Рабочий газ – смесь метана и водорода при давлении 100 Торр [2].

Полиалмаз используется для формирования вакуумно-плотных выходных окон сверхмощных (порядка 1 МВт) источников излучения миллиметрового диапазона длин волн, таких как гиротроны, для теплоотводов полупроводниковых лазеров. На его основе изготавливаются детекторы УФ-диапазона и т.п. Делаются первые шаги по применению полиалмаза в корпусах мощных СВЧ-транзисторов.

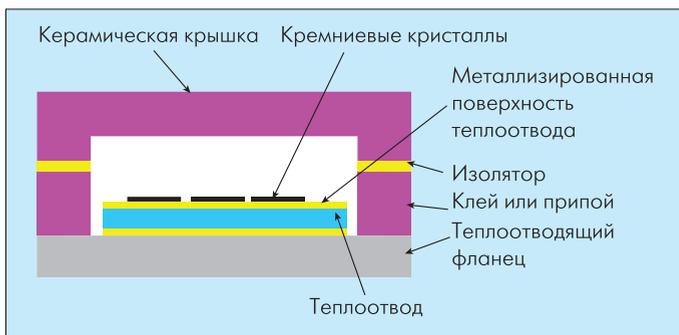


Рис. 1. Корпус СВЧ-транзистора

Создание корпуса мощного транзистора с теплоотводом из полиалмаза требует решения не только вопросов металлизации его поверхностей, так же как и для алюминитридной керамики, но и проблем, связанных со значительным различием коэффициентов теплового расширения материалов, применяемых в конструкции прибора.

В ФГУП "НПП "Пульсар" в ходе работ по выполнению теплоотвода мощных СВЧ-приборов на основе полиалмаза разработан корпус ЛПД миллиметрового диапазона. Мощность, генерируемая меза-структурой диода, смонтированной на алмазном теплоотводе, в четыре раза превышала мощность подобной меза-структуры на медном теплоотводе. Разработан и корпус мощного транзистора S-диапазона с теплоотводом из полиалмаза.

В ходе разработки корпуса было показано, что наиболее эффективный метод металлизации полиалмаза – осаждение в вакууме многослойной системы на основе платины и золота, первый слой которой – карбидообразующие металлы (хром, кобальт, ниобий цирконий, железо, молибден, никель, титан, вольфрам, палладий, ванадий и др.). Наиболее широкое применение нашли системы хром-палладий-золото, хром-платина-золото, молибден-золото, титан-платина-золото.

Теплоотвод из полиалмаза или алюминитридной керамики необходимо монтировать на фланец корпуса. Здесь основная проблема – большое различие коэффициентов теплового расширения материалов теплоотвода и фланца корпуса (псевдосплав МД 40), достигающее $8,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$. Это может вызвать чрезмерные механические напряжения в теплоотводе, что в свою очередь способно привести к его механическому разрушению либо сразу после пайки, либо при монтаже кремниевых кристалла на теплоотвод пайкой эвтектическим припоем золото-кремний, а также при испытаниях и эксплуатации в условиях циклических температурных изменений. Один из

Таблица 1. Свойства различных диэлектрических материалов теплоотвода корпусов СВЧ-транзисторов и кремния

Свойства материалов	BeO-керамика [1]	Полиалмаз [2]	AlN-керамика	Кремний [3]	Алмаз [3]
ϵ	6,6	5,7	7,5–8,0	–	–
$\text{tg}\delta$	$2 \cdot 10^{-4}$	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	–	–
λ при 300К, Вт/м·К	215	1990–2200	140–180	–	–
Коэффициент теплового расширения, $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ (при температуре, °С)	5,5 (25–100)	–	2,65 (20–100)	1,41 (-73)	0,64 (-220–30)
	8,0 (25–300)	–	3,80 (20–300)	2,56 (27)	2,25 (30–280)
	9,6 (25–600)	1,0 (27)	4,19 (20–400)	3,2 (127)	3,78 (280–830)
	10,8 (25–800)	4,4 (727)	4,47 (20–500)	3,86 (327)	

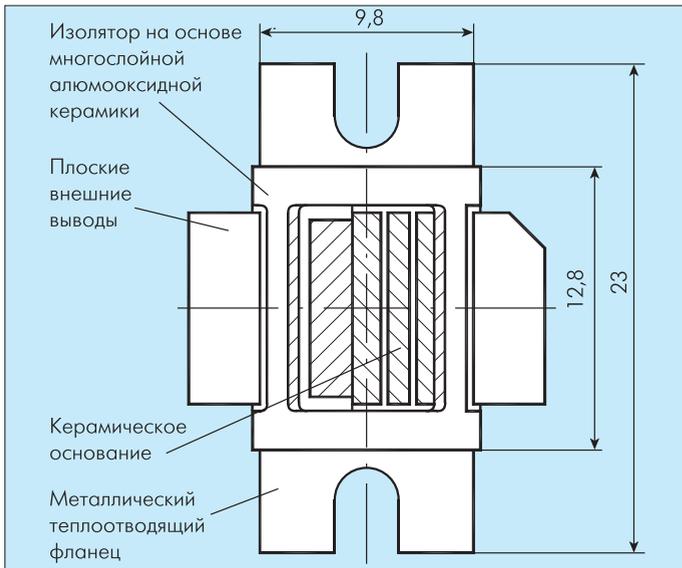


Рис.2. Конструкция корпуса с теплоотводом из AlN-керамики или полиалмаза для мощного СВЧ-транзистора

способов уменьшения механических напряжений в теплоотводе – снижение температуры его монтажа в корпусе. Этого можно достичь, например, путем замены высокотемпературного припоя на основе серебра фольгой из эвтектического сплава золото-германий или золото-кремний. При температуре пайки -450°C в припой переходит золото из покрытия корпуса и теплоотвода. При этом состав припоя уже не является эвтектическим, что позволяет проводить последующий монтаж кремниевых кристаллов при температуре 420°C . Для реализации этого процесса достаточно правильно выбрать размеры фольги эвтектического припоя и толщину золотого покрытия корпуса и теплоотвода.

На основе разработанных технологических процессов изготовлены и испытаны корпуса мощных транзисторов с алюмонитридной керамикой и полиалмазом. За основу был выбран корпус с теплоотводом из BeO-керамики для транзистора с выходной мощностью 50 Вт (рис.2). Корпус представляет собой металлокерамическую конструкцию, состоящую из металлического теплопроводящего фланца, к которому припаяно основание из металлизированной BeO-керамики с изолированной площадкой для монтажа полупроводниковых кристаллов с активными приборами. На основании из BeO-керамики размещен изолятор из многослойной алюмооксидной керамики, к которому припаяны плоские внешние выводы. Во внутренней полости корпуса предусмотрены металлизированные площадки для монтажа активных и согласующих элементов транзистора. На нижнем слое керамического изолятора сформирована полосковая линия с волновым сопротивлением

Таблица 2. Расчетные значения теплового сопротивления изготовленных корпусов

Материал теплоотвода	λ , Вт/м·К	R_{θ} , $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$
BeO-керамика	220	1,067
AlN-керамика	170	1,262
Полиалмаз	1500	0,625

50 Ом. Все конструктивные элементы корпуса соединены припоем на основе серебра. В корпусах с альтернативными BeO-керамике материалами в месте расположения площадки для монтажа кристаллов в керамическом основании вырублено прямоугольное отверстие, в котором размещены теплоотводы из полиалмаза либо AlN-керамики.

Проведенные расчеты теплового сопротивления корпусов показали, что как полиалмаз, так и AlN-керамика способны обеспечить энергетические параметры мощных транзисторов (табл.2). При этом тепловое сопротивление корпуса с теплоотводом из полиалмаза много меньше, чем у корпуса с теплоотводом на основе BeO-керамики. Следует также иметь в виду, что при нагреве транзистора в процессе работы тепловое сопротивление корпуса с BeO-керамикой значительно увеличивается, а корпуса с AlN-керамикой практически не изменяется.

Испытания на стойкость к механическим, тепловым и технологическим воздействиям подтвердили эксплуатационную надежность экспериментальных образцов корпусов с теплоотводами из полиалмаза и AlN-керамики.

В последнее время внимание разработчиков все больше привлекают транзисторы на основе нитрида галлия (GaN), способные работать при высоких температурах и на более высоких частотах, чем кремниевые приборы. Так, мощность GaN-транзисторов компании Nitronex (США) достигает 50 Вт на частоте 2,5 ГГц, транзисторов фирмы Eudina (Япония) – 180 Вт на частотах 2,11–2,17 ГГц. Появились сообщения о формировании GaN-структур на тонких подложках из полиалмаза*. Реализация уникальных свойств таких структур (большие уровни мощности, способность работать при высоких температурах и на сверхвысоких частотах), вероятнее всего, возможна только в корпусе с теплоотводом из полиалмаза.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Моряков О.С., Куцко О.С. Свойства материалов, применяемых в корпусах мощных полупроводниковых приборов для теплоотвода и термокомпенсирования.— Обзоры по электронной технике. Серия 2. Полупроводниковые приборы. ЦНИИ "Электроника".— М., 1978.
2. Ральченко В.Г., Конов В.И., Леонтьев И.А. Свойства и применение поликристаллических алмазных пластин.— Сб. трудов 7-ой Международной конференции "Высокие Технологии в Промышленности России", 29-30 июня 2001.— М.: МГУ,
3. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства. Справочник. 2-е изд.— М., Металлургия, 1976.
4. Третьяков Ю.Д. Твердофазные реакции.— М.: Химия, 1978.

*См.: Васильев А., Данилин В., Жукова Т. Новое поколение полупроводниковых материалов и приборов. Через GaN к алмазу.— Наст. №, с.68.