

Обеспечение вакуумной плотности металлокерамических узлов интегральных схем

Для обеспечения вакуумной плотности металлокерамических узлов, применяемых в корпусах изделий электроники, необходим правильный выбор припоя и температуры пайки, расчет оптимальной величины зазора в соединении и моделирование зон наибольших внутренних напряжений в металлокерамическом узле.

**Владимир Ланин
Руслан Сафаров**

Металлокерамические узлы (МКУ), представляющие собой неразъемное соединение деталей из металла и керамики, обычно получаемое пайкой, широко распространены в электронной промышленности. Для сборки металлокерамических корпусов, где используются МКУ (рис. 1), применяют два типа припоя, так как пайка происходит в два этапа:

- пайка МКУ, содержащего медную обечайку, в отверстия которой установлен керамический изолятор с выводом из композиционного материала МК (медь-ковар);
- пайка остальных деталей корпуса (на обечайку с паяными внешними выводами в изоляторах присоединяется медная подложка, на которой размещается термокомпенсатор, а сверху припаивается ободок из ковара).

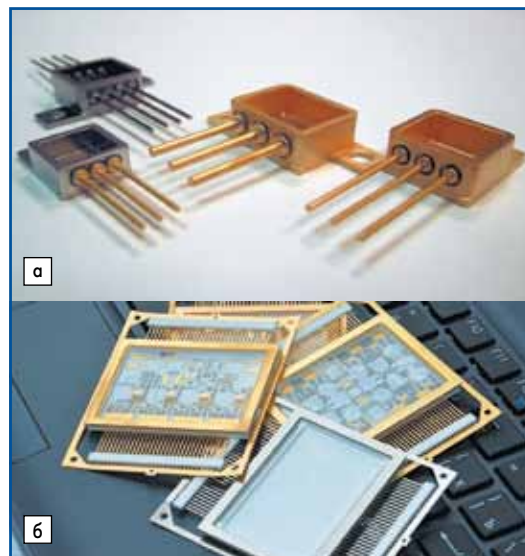


Рис. 1. Металлокерамические корпуса:
а) полупроводниковых приборов;
б) интегральных микросхем

Введение

Для обеспечения требуемого качества МКУ необходимо правильный выбор припоя, расчет оптимальной величины зазора в соединении и внутренних напряжений в керамической детали.

Выбор припоев для пайки МКУ

В производстве корпусов полупроводниковых приборов применяют высокотемпературные припои с температурой плавления более +450 °С. Однако не все припои можно использовать при изготовлении МКУ с высокими требованиями по вакуумной плотности. Для исключения разрушения паяных соединений на стадии эксплуатации МКУ припои должны удовлетворять следующим требованиям [1]:

- обладать хорошей жидкотекучестью и высокой смачивающей способностью для обеспечения затекания припоя в зазоры между деталями;
- иметь температуру плавления не менее чем на 50–60 °С ниже температуры плавления паяемых металлов и не менее чем на 100 °С выше технологической температуры прогрева прибора в процессе сборки;
- иметь малый температурный интервал кристаллизации, так как сплавы с интервалом кристаллизации более 50 °С склонны к ликвации и не обеспечивают получение надежных вакуумноплотных паяных соединений;
- обладать высокой механической прочностью, пластичностью, а также коррозионной стойкостью.

Детали корпуса, на которые перед пайкой наносится покрытие, обязательно обезгаживаются. Обезгаживающий отжиг припоев и деталей вызван присутствием в металлах газов. Газы попадают в металл в процессе плавки, разливки, обработки и хранения его на воздухе, а также в процессе нанесения гальванопокрытия. Отжиг деталей и припоев позволяет улучшить качество паяных швов. Из необезгаженных деталей и припоев в процессе пайки выделяются газы, при попадании в расплавленный припой они образуют в нем раковины, ухудшающие герметичность спая [2]. Для полного и быстро-

го обезгаживания отжиг следует проводить при максимально возможной температуре, ограничиваемой только ростом кристаллов, вызывающим изменение формы и размеров деталей.

С учетом этих требований для пайки металлокерамических корпусов используют припой, температура плавления которых не ниже +600 °С. Это вызвано тем, что в технологическом процессе сборки транзисторов корпус прибора подвергается воздействию высоких температур, порядка +450...+500 °С. Верхний предел температуры плавления припоя ограничивается типом используемого оборудования, а также процессами взаимодействия элементов припоя с конструкционными материалами, приводящими к образованию механических напряжений и снижению надежности несогласованных спаев.

Для уменьшения степени взаимодействия припоя с элементами корпуса температура пайки не должна превышать +850 °С. Поскольку температура пайки выполняется с перегревом на 20–40 °С относительно температуры полного расплавления, в качестве припоя для пайки на первом этапе следует использовать припой эвтектического состава с температурой плавления не выше +810 °С. Данному требованию соответствует эвтектический припой ПСр-72 с температурой плавления +779 °С. Подходящими сплавами с низкой упругостью пара для пайки на втором этапе являются сплавы систем серебро-медь-олово, серебро-медь-индий, золото-галлий, золото-индий и серебро-галлий.

При выборе припоя учитывают особенности взаимодействия компонентов припоя с элементами корпуса. Припои эвтектического состава типа ПСр72 легко проникают по границам зерен основных металлов, особенно если в соединяемых деталях имеются внутренние напряжения. Основной компонент припоя — серебро и медная обечайка образуют между собой систему с неограниченной растворимостью в жидком и твердом состояниях. В процессе пайки этот припой обогащается медью, за счет чего становится более тугоплавким. Высокая температура пайки и длительная выдержка приводят к образованию в шве сплава с большим интервалом кристаллизации и, следовательно, к увеличению пористости паяных соединений [3]. Процесс взаимодействия расплава припоя ПСр-72 с металлизационной пастой и межзеренное проникновение через слой металлизации к керамике приводит к образованию дефектов в МКУ (рис. 2).

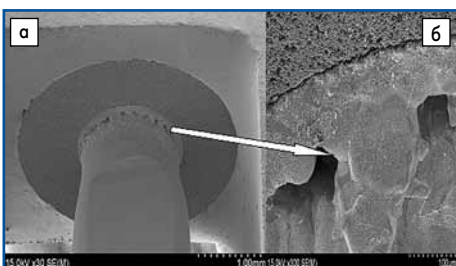


Рис. 2. Образование пустот в МКУ:
а) увеличение 30х; б) увеличение 300х

В результате металлографического анализа герметичных и негерметичных паяных соединений, выполненных припоем ПСр72, установлено, что в припое подавляющего большинства вакуумноплотных спаев содержание меди не превышает 30%, тогда как в припое негерметичных спаев оно составляет более 70%, то есть припои имеют заэвтектический состав. При затвердевании в них могут образовываться усадочные раковины и межкристаллическая пористость. Поэтому для пайки корпусов с высокой герметичностью могут применяться только те припои, чей химический состав до и после пайки соответствует положения I–I, II–II и III–III на диаграмме состояния системы Ag-Cu [4] (рис. 3). Припои, химический состав которых ограничен областью II–III и I–II, имеют очень большой температурный интервал кристаллизации, при затвердевании в них образуются рассредоточенные усадочные раковины и пористость, поэтому использовать их для пайки деталей с высокими требованиями по герметичности приборов нецелесообразно. Выделенные области I, II, III припоев рекомендуются для пайки.

Пайка деталей корпуса из ковара имеет свои особенности, так как с ростом температуры пайки диффузия атомов припоя по границам зерен ковара увеличивается. Поэтому перегрев припоя при пайке сопровождается интенсивной диффузией его по границам зерен ковара и ухудшением свойств паяных соединений. Проникновение припоя по границам зерен ковара приводит к появлению микротрещин в месте спаивания и потере герметичности изделий.

Качество спаивания керамики с металлом зависит от времени выдержки, обычно равного 1–2 мин. В начале пайки соединяемые поверхности смачиваются припоем, затем происходит диффузия жидкого припоя по границам зерен металла и растворение металлов в припое, в результате чего изменяется состав припоя: в нем появляются компоненты соединяемых металлов. Установлен различный

характер взаимодействия медного припоя с керамикой, имеющей молибденовую и молибденово-марганцевую металлизацию, при температуре пайки +1100 °С.

При пайке керамики с молибденовой металлизацией жидкий припой смачивает поверхность металлизации и под действием капиллярных сил заполняет пространство между зернами молибдена, состоящее преимущественно из стеклофазы (около 80%), которая в жидком состоянии легко вытесняется медью. Таким образом, медь, проникая через металлизационное покрытие до керамики, ослабляет их связь [1].

При пайке керамики, покрытой молибденово-марганцевой металлизацией, жидкий припой также смачивает поверхность металлизации и под действием капиллярных сил стремится заполнить межмолибденовое пространство, состоящее преимущественно из марганцевой шпинели (до 60–80%), кристаллическая фаза которой остается твердой. В зависимости от дисперсности и распределения марганцевой шпинели в межмолибденовом пространстве медь может проникнуть через слой металлизации до керамики и ослабить их связь в процессе вжигания. Если же марганцевая шпинель полностью заполняет межмолибденовое пространство, медь проникнуть до поверхности керамики не может и соединение керамики с металлом получается надежным.

Для создания надежных металлокерамических спаев по слою металлизации осаждают никелевые покрытия толщиной от 2–3 до 10–12 мкм. В этом случае при пайке происходит частичное растворение никеля в медном припое и смачивание молибдена, но медь до поверхности керамики, как при молибденовой, так и молибденово-марганцевой металлизации, не проникает. Барьерные плотные никелевые слои по слою металлизации обеспечивают получение высокопрочных и термостойких металлокерамических спаев.

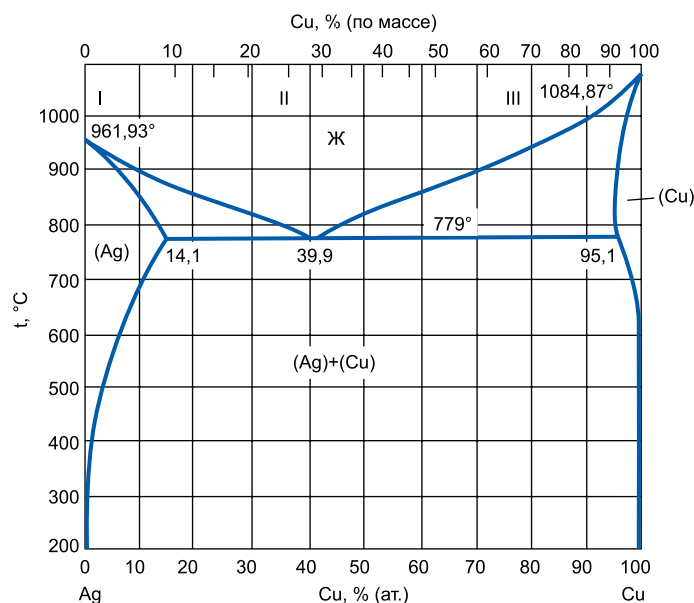


Рис. 3. Диаграмма состояния Cu-Ag

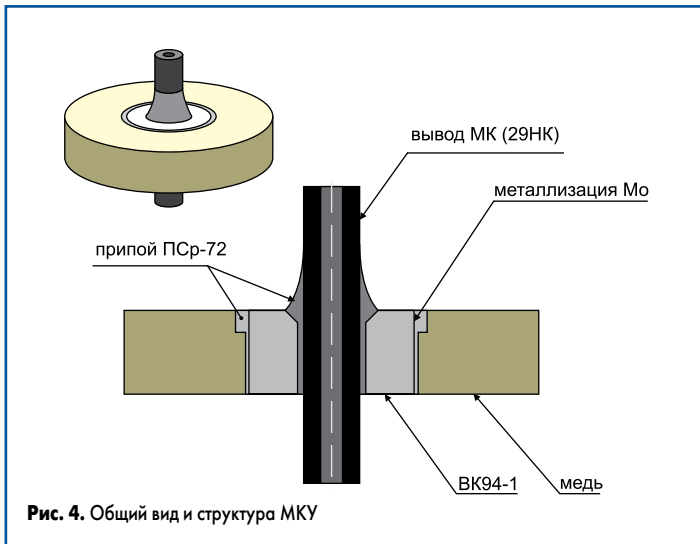


Рис. 4. Общий вид и структура МКУ

При выполнении металлокерамического спаивания зазоры между соединяемыми деталями должны быть оптимальными. Вследствие разности КТЛР при нагревании происходит изменение зазоров между деталями и возникают напряжения, вызывающие разрушение спаивания. Расчет максимального и минимального зазоров между деталями из разнородных материалов проводят по формулам [5]:

$$D_{\max} = D(\alpha_2 - \alpha_1)T + \Delta_2(1 + \alpha_2 T) + \Delta_1(1 + \alpha_1 T), \text{ мм};$$

$$D_{\min} = D(\alpha_2 - \alpha_1)T + \delta_2(1 + \alpha_2 T) + \delta_1(1 + \alpha_1 T), \text{ мм};$$

где D_{\max} — максимальный внутренний диаметр внешней детали; D — номинальный внутренний диаметр внешней детали; D_{\min} — минимальный внешний диаметр внутренней детали; d — номинал внешнего диаметра внутренней детали при температуре пайки; Δ_1 — максимальный допуск на внешний диаметр внутренней детали; Δ_2 — максимальный допуск на внутренний диаметр внешней детали; T — температура пайки, °C; α — коэффициенты термического линейного расширения внутренней детали (α_1) и внешней детали (α_2) при температуре пайки.

Для разных типов припоя оптимальная величина зазора определяется процессами взаимодействия элементов припоя с материалом покрытия, приводящими к изменению состава припоя. Количество припоя, необходимое для качественного соединения керамического изолятора с выводами и с обечайкой металлокерамического корпуса, как и в случае пайки соединения телескопического типа, определяется по формуле [5]:

$$Q = 1,5(\pi/4)h\gamma(\Delta_{\max}^2 - d_{\min}^2);$$

$$D_{\max} = (D + \Delta_2)(1 + \alpha_2 T),$$

$$d_{\min} = (d - \Delta_1)(1 + \alpha_1 T),$$

где h — высота паяного шва; γ — удельный вес припоя; 1,5 — коэффициент, учитывающий объем галтелей.

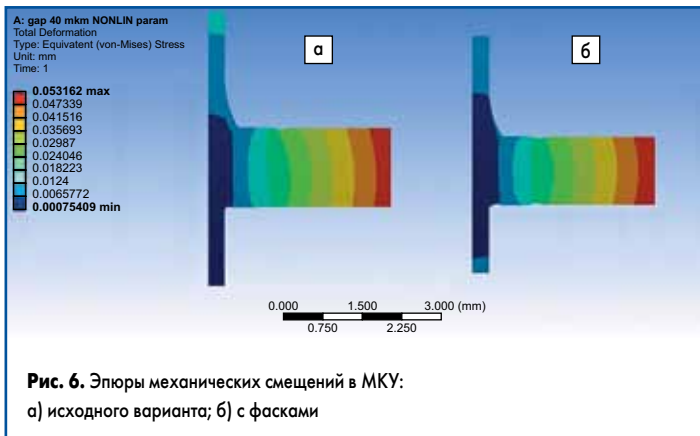


Рис. 6. Эпюры механических смещений в МКУ:
а) исходного варианта; б) с фасками

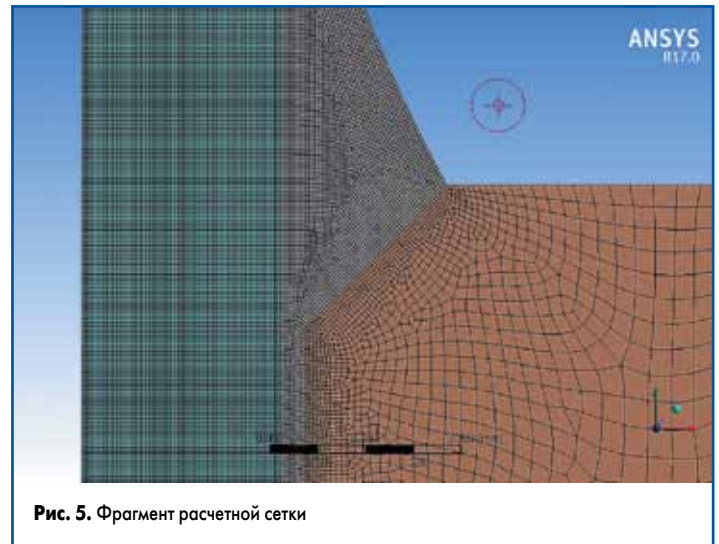


Рис. 5. Фрагмент расчетной сетки

Правильный расчет количества припоя и строгое соблюдение этих норм при пайке позволяют избежать ненужных напылов и чрезмерно больших галтелей.

При пайке МКУ важную роль играет температурный режим, который влияет не только на растекание припоя, но и на образование термических напряжений, вызывающих возникновение микротрещин в керамике. С учетом этого профиль распределения температуры по каналу конвейерной водородной печи СК11/16-10-8 должен обеспечивать градиент температуры 10–15 °C/мин на стадии перехода припоя из жидкого состояния в твердое.

Моделирование термических напряжений в МКУ

В связи с тем, что пайка обычно проходит при повышенных температурах, а материалы МКУ обладают различными КТЛР, после пайки при охлаждении изделия в нем возникают термомеханические напряжения. Целью моделирования является определение зон возникновения наибольших термомеханических напряжений в МКУ. Особое внимание уделяется напряженно-деформированному состоянию (НДС) керамической детали, как наиболее хрупкой части узла (рис. 4).

Для моделирования в среде ANSYS Mechanical выбрана сетка преимущественно из квадратных и треугольных элементов второго порядка (с промежуточными узлами) PLANE183. Размер базового элемента принят $8e^{-2}$ мм, для деталей припоя и части детали из ковара задан размер элемента $5e^{-3}$ мм (рис. 5). Выбрано равномерное температурное поле ($T_1 = +20$ °C) как температура эксплуатации МКУ и начальная температура, при которой напряжения были нулевые, выбрано $T_0 = +800$ °C. Чтобы избежать перемещения тела как жесткого целого, были ограничены перемещения вдоль оси Y самой правой точки узла.

Достаточно большая величина внутренних напряжений выявлена на границе вывода МКУ с молибденовой металлизацией.

Величины деформации и механические напряжения в МКУ для зазора 40 мкм для исходного и доработанного вариантов приведены на рис. 6, 7. Предложено изменить конструкцию МКУ за счет введения

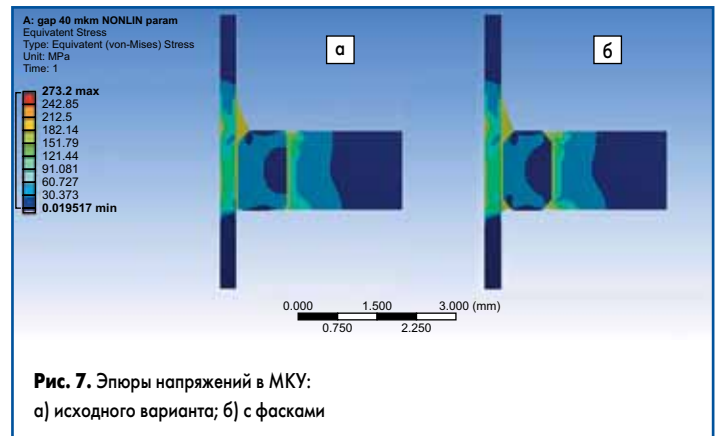


Рис. 7. Эпюры напряжений в МКУ:
а) исходного варианта; б) с фасками

фасок при формировании металлизации, что позволит более равномерно распределить возникающие напряжения в МКУ.

Параметрическое исследование зависимости максимальных эквивалентных напряжений в керамической детали от зазора между деталью из ковара и керамикой в пределах 10–200 мкм показало, что с ростом величины зазора для пайки и увеличением массы припоя в соединении, внутренние напряжения в керамической детали растут (рис. 8). Для варианта с фасками значения напряжений существенно ниже.

Выводы

Для получения вакуумноплотных спаев с коваром необходимо производить отжиг деталей для снижения внутренних напряжений, паять при температуре, не более чем на 20–30 °С превышающей температуру плавления припоя. Перед пайкой детали из ковара необходимо никелировать при толщине покрытия 10–15 мкм с последующим отжигом при температуре +950 °С. Для устранения проникновения жидкой фазы по границам зерен ковара целесообразно применять золотые или медно-германиевые припои. Пайку этими припоями можно выполнять без предварительного нанесения покрытия на детали из ковара.

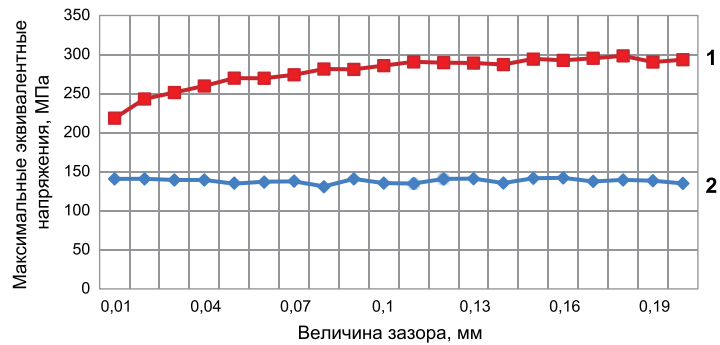


Рис. 8. Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в керамической детали от величины зазора для двух вариантов геометрии МКУ: 1 — вариант геометрии без фасок; 2 — вариант геометрии с фасками

Вариант с фасками в МКУ предпочтителен для применения, ввиду сниженных значений термомеханических напряжений, возникающих в керамических деталях. Пониженные напряжения уменьшают риск образования и распространения трещин, что, несомненно, благоприятно сказывается на долговечности эксплуатации МКУ.

Литература

1. Солодуха В. А., Турцевич А. С., Керенцев А. Ф. Металлокерамические корпуса мощных полупроводниковых приборов. Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины, 2010.
2. Мазур А. И., Алехин В. П., Шоршоров М. Х. Процессы сварки и пайки в производстве полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1981.
3. Ланин В. Л., Керенцев А. Ф., Соловьев Я. А. Факторы, влияющие на герметичность мощных транзисторов в металlostеклянных и металлокерамических корпусах // Силовая электроника. 2010. № 1.
4. Хансен И., Андерко К. Структуры двойных сплавов: в 2 т. М.: Металлургия, 1962.
5. Ерошев В. К., Козлов Ю. А., Павлова В. Д. Конструирование и технология паяных металлокерамических узлов. М.: Энергия, 1988.