

Технология монтажа микроплат в корпусах многофункциональных модулей

Технология сборки многофункциональных модулей СВЧ отличается высокой трудоемкостью, особыми требованиями к взаимному расположению элементов, минимальными потерями сигналов в СВЧ диапазоне, необходимостью обеспечения высоких удельных значений рассеиваемой тепловой мощности. Особое внимание при сборке модулей уделяется монтажу микроплат с компонентами в корпус, что позволяет не только сократить трудоемкость, но и повысить выход годных изделий.

Владимир Ланин

vlanin@bsuir.unibel.by

Конструктивно-технологические особенности модулей СВЧ

Модули СВЧ широко применяются в приемопередающей аппаратуре телекоммуникационных линий, авиационной и космической аппаратуре. Преимущественной формой конструкции модулей СВЧ является планарная, основной конструктивный элемент ячейки — рамка, а герметичного блока — корпус [1]. Наиболее теплонепригодные элементы монтируются непосредственно на рамку или корпус с развитой поверхностью. В связи с относительно небольшой плотностью монтажа компонентов в модулях, обусловленной особенностями элементной базы, возможна внутренняя коммутация между микросборками без применения печатных плат. Удельная рассеиваемая мощность таких блоков 100–150 Вт/дм³ или 60–80 Вт/кг, на анодированном алюминиевом основании — 200–300 Вт/дм³ или 180–300 Вт/кг [2].

Коммутация в микросборках осуществляется микрополосковыми линиями, выполненными на обеих сторонах подложки с высокой точностью рисунка и минимальными потерями в СВЧ диапазоне (используются поликор, сапфир, керамика 22ХС, органические материалы — фторопласт, полиимид и др.). Сложность в организации пересечения микрополосковых линий заставляет использовать двустороннее расположение микросборо-

рок на основании, а конструирование блока выполнять по принципу непрерывной схемы. Необходимо соблюдение однородности СВЧ тракта предъявляет жесткие требования к взаимному расположению выходных микрополосков сопрягаемых микросборок (таблица). В связи с необходимостью обеспечения хорошего электрического контакта экранирующих трактов микрополосковых линий с корпусом, а компонентов микросборки с экранирующими металлическими слоями подложек одним из конструктивных требований к монтажу таких устройств является необходимость многократной пайки в блоке без выведения из строя уже выполненных соединений.

Для выполнения принципа непрерывной схемы соединение по СВЧ тракту между микросборками выполняется с помощью коаксиального перехода. Выводы СВЧ сигнала из модуля выполняются с помощью коаксиальных микрополосковых герметичных соединителей. Для герметизации соединителей используется металлостеклянный спай. Соединители герметизируются пайкой, электрические соединения между СВЧ микросборками и соединителем осуществляются перемычками из фольги.

Расстояние от плоскости установки микросборки до оси соединителя зависит от способа крепления микросборок и толщины подложек. Габаритные размеры модулей СВЧ чаще всего определяются не содержащимися в них ИМС и компонентами, а числом соединителей и различного рода СВЧ переходов.

Дополнительный объем, необходимый для размещения таких переходов и обеспечения межблочной коммутации, как правило, превышает физический объем самих блоков. Для достижения высокой стабильности параметров каждый функциональный СВЧ блок герметизируется в корпус, используются входные и выходные соединители для индивидуальной настройки блоков, а также их проверки в составе устройства. Промежуточные СВЧ соединители служат только для настройки блоков.

Выполнение СВЧ устройств с использованием отдельных функциональных герметичных блоков уже исчерпало свои возможности и в настоящее время препятствует дальнейшему снижению массогабарит-

Таблица. Конструктивные параметры неоднородностей СВЧ микроблоков

Неоднородности СВЧ тракта	До 1 ГГц		До 10 ГГц	
	Толщина подложки, мм			
	0,5	1,0	0,5	1,0
Зазор между микросборками	0,15 ± 0,05	0,15 ± 0,05	0,1 ± 0,03	0,1 ± 0,03
Несоосность выходных микрополосков	0,15	0,3	0,1	0,2
Разновысотность уровней выходных микрополосков	0,3	0,3	0,2	0,2
Зазор между микросборками и штырем гермосоединителя	0,22	0,22	0,22	0,22

ных показателей изделий вследствие большого числа соединителей и проводов коммутации. Сравнительный анализ показывает, что предпочтительной является компоновка системы на основе четырехканальных блоков.

Следующим шагом в развитии микроэлектронной СВЧ аппаратуры является создание многоканальных СВЧ блоков с общей герметизацией и жидкостным охлаждением, что дает возможность снизить массу в 2 раза и объем в 5 раз по сравнению с устройствами, выполненными на основе отдельных функциональных блоков, устанавливаемых на общей коммутационной плате с жидкостным охлаждением. При этом выигрыш достигается за счет уменьшения металлоемкости конструкции блока и исключения проводов коммутации.

Методы монтажа микроплат в модули

Методы монтажа микроплат в модули с помощью винтов или эпоксидного клея с металлическим наполнителем [3] не обеспечивают низкого теплового сопротивления контакта. При сборке СВЧ многофункциональных модулей и микросборок надежный омический контакт платы с корпусом при низком тепловом сопротивлении и высокой механической прочности соединения достигается пайкой легкоплавкими припоями. При этом важно обеспечить непрерывный и равномерный по толщине паяный шов и отсутствие остатков флюсов и загрязнений в изделии. Существующие способы монтажа микрополосковых плат в корпуса модулей СВЧ методом пайки с использованием спирто-канифольных флюсов имеют существенные недостатки:

- невозможность полной очистки остатков флюса ухудшает параметры микросборок, снижает их надежность и долговечность;
- неполное смачивание припоем паяемой поверхности плат (60–70%) ухудшает тепловое сопротивление перехода плата — корпус.

Для повышения надежности соединений платы с основанием корпуса применяли свинцовые прокладки с легкоплавким покрытием оловом, что позволило получить соединения с гарантированной толщиной паяного шва около 0,1–0,25 мм, а также уменьшить уровень термомеханических напряжений в соединении при термоциклировании: –60 °С в течение 30 мин, нагрев до +85 °С в течение 30 мин, что соответственно уменьшает опасность растрескивания плат из-за различного ТКЛР платы и корпуса при циклическом воздействии температур [4].

Аналогичные результаты были получены при использовании припойной прокладки, армированной медной сеткой толщиной 0,2 мм с размером ячеек 0,7×0,7 мм, проложенной перед пайкой между микрополосковой платой и основанием корпуса (рис. 1). Однако использование сеток увеличивает объем подготовительных работ, усложняет технологический процесс и не устраняет дефектов флюсовой пайки.

Одновременное присоединение микроплат к корпусу и компонентов на платы с помо-

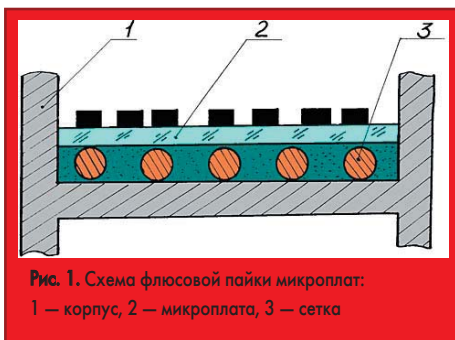


Рис. 1. Схема флюсовой пайки микроплат: 1 — корпус, 2 — микроплата, 3 — сетка

щью паяльной пасты и ее оплавления в печи («сэндвич»-технология — Sandwich Soldering Technology), сокращая длительность технологического процесса, создает значительные тепловые нагрузки на компоненты, что может в ряде случаев ухудшить электрические параметры микросборок. После пайки требуется тщательное удаление остатков флюса промывкой в ультразвуковой ванне [5].

Более перспективные способы бесфлюсовой пайки, основанные на удалении оксидов за счет диссоциации в вакууме или атмосфере инертных газов, восстановления их в активной газовой среде, а также с помощью механических колебаний. Диссоциация оксидов в вакууме или их восстановление в активной среде требует высоких температур, специального вакуумного оборудования и сопровождается насыщением расплавленного припоя водородом или аргоном, что приводит к образованию пористого шва.

При механическом способе удаления оксидных пленок в момент расплавления припоя одной из паяемых деталей, например, плате, сообщают низкочастотные колебания частотой 50–300 Гц с помощью вибратора (рис. 2). Перемещение паяемых поверхностей относительно друг друга в параллельных плоскостях с амплитудой до 1 мм, создаваемой вибратором установок пайки ЭМ-415, ЭМ-445, позволяет разрушить механическим путем оксидные пленки на припое. Однако такой способ пайки притиркой достаточно длителен (от 30 до 90 с), требует увеличения габаритов микроблока на двойную амплитуду колебаний плат и не обеспечивает полного удаления остатков оксидов из зоны пайки [6].

Применение ультразвуковых (УЗ) колебаний частотой 18,0–23,0 кГц позволяет полностью отказаться от применения флюсов,

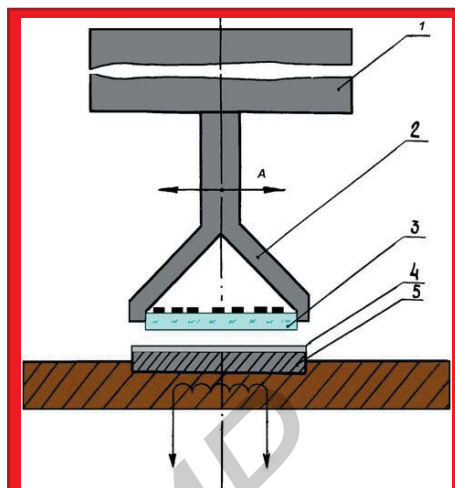


Рис. 2. Схема монтажа микроплат вибрационной пайкой: 1 — вибратор, 2 — держатель, 3 — микроплата, 4 — припой, 5 — основание

при этом исключается операция отмывки флюса, сокращается общая длительность технологического процесса монтажа микроплат. При прохождении упругих колебаний УЗ частоты через расплав припоя в последнем возникает кавитация и микропотоки, что и обеспечивает разрушение оксидных пленок и полное смачивание припоем паяемых поверхностей.

Ультразвуковая технология монтажа микроплат

Разработан процесс бесфлюсовой пайки микрополосковых плат под воздействием УЗ и инфракрасной (ИК) энергии и определены его оптимальные режимы. Паяемые поверхности плат размером 48×60 мм с металлизированным покрытием хром-медь и гальваническим покрытием золотом 3 мкм или сплавом олово-висмут 6 мкм монтировались в корпуса модулей размером 110×54×20 мм. Корпуса, изготовленные из дюралюмина Д16Т, химически покрывались никелем, а затем сплавом олово-висмут толщиной 6–9 мкм. Паяемые поверхности плат и корпуса обезжиривались спирто-бензиновой смесью.

Для осуществления процесса бесфлюсовой пайки микроплат к основанию корпус устанавливался между двумя УЗ системами, расположенными соосно (рис. 3). Для надежной

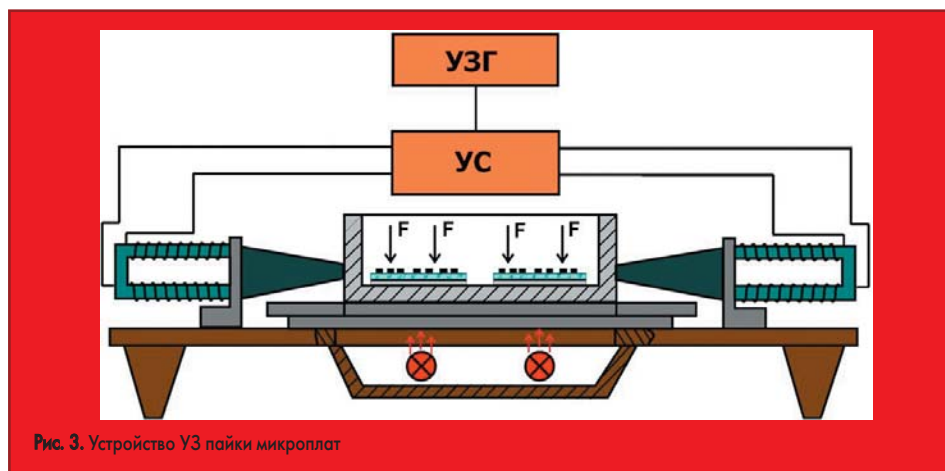


Рис. 3. Устройство УЗ пайки микроплат



Рис. 4. Установка УЗ пайки микроплат

передачи энергии УЗ колебаний корпусу волноводы обеих систем были прижаты к нему с усилием 100–150 Н. Напряжение УЗ частоты от генератора УЗГ5-0,4 поступало на обмотки магнитострикционных преобразователей, соединенных последовательно. Преобразователи настраивались на резонансную частоту с помощью параллельной схемы компенсации реактивного сопротивления преобразователей.

Корпус нагревался за счет ИК энергии от двух кварцевых галогенных ламп КИ-220-1000, закрепленных в диффузных отражателях с экранами из алюминиевой фольги и охлаждаемых проточной водой. Температура измеряла с помощью хромель-копелевой микротермопары диаметром 0,4 мм, закрепленной на поверхности корпуса, выводы которой соединялись с электронным потенциометром КСП-4, управляющим напряжением питания ИК ламп с помощью блока силовых реле. В процессе пайки к плате прикладывали статическое усилие величиной 1–5 Н, создаваемое подпружиненными штырьками в четырех точках платы.

Для бесфлюсовой УЗ пайки микроплат в корпуса многофункциональных модулей СВЧ диапазона разработана и изготовлена установка, состоящая из двух УЗ-систем, двух модулей ИК нагрева, УЗ генератора и программного устройства управления (рис. 4). Для повышения качества паяных соединений сведены к минимуму дифракционные явления и эффекты суперпозиции акустических волн за счет девиации частоты. Оптимизирована толщина припоя в соединении и исключен эффект его распыления в местах подвода УЗ колебаний. Для исключения воздействия ИК излучения и УЗ колебаний на обслуживающий персонал применено экранирование устройства. Рабочий диапазон УЗ частот 20–22 кГц с девиацией частоты 1 кГц. При температуре 150–250 °С и мощности УЗ колебаний 0,4 кВт, ИК нагревателей 2,0 кВт время пайки составляет не более 25 с.

Для эффективного разрушения окисных пленок и равномерного смачивания всей поверхности платы припоем в корпусе создавали режим бегущей волны путем изменения длин волн на $\lambda/16$ и $\lambda/32$ или частоты на 1,2 и 0,6 кГц [7]. Плавную перестройку частоты генератора осуществляли с помощью блока девиации частоты. Интенсивность ультразвука при средней частоте преобразователя 20 кГц и амплитуде колебаний 10 мкм составила $18,3 \cdot 10^4$ Вт/м². Кавитационное давление в расплавленном припое измеряли кавитометром

с помощью измерительного щупа, соединенного с пьезоэлектрическим преобразователем. Кавитометр позволял измерять давление от 5 до $3 \cdot 10^4$ Па в кавитационной области размером $1,0 \cdot 10^{-4}$ м² в диапазоне частот работы УЗ преобразователей от 18 до 50 кГц. Амплитуду колебаний контролировали с помощью вибрметра.

Сплошность паяного шва проверяли на рентгенотелевизионном микроскопе МРТ-7. Прочность паяных соединений на сдвиг определяли на машине типа РП-100. Степень смачиваемости плат $S_{п}/S_0$ оценивали при отделении плат от корпуса с помощью подсчета площади, покрытой припоем, на микроскопе МБС-9 и исследовали в зависимости от амплитуды и частоты колебаний, времени воздействия, температуры пайки, усилия прижима плат к корпусу, толщины прокладки припоя.

Хорошее смачивание для всех видов покрытий и припоев достигнуто при амплитуде УЗ колебаний, равной 10 мкм, что соответствовало выходному напряжению генератора 50 В и току подмагничивания 2 А. Увеличение амплитуды колебаний до 20 мкм не приводит к дальнейшему возрастанию степени смачивания, так как при значительной интенсивности УЗ колебаний, вводимых в припой, в большей степени растут и процессы окисления припоя. При амплитудах выше 20 мкм возможно распыление припоя в местах пучностей колебаний и загрязнение им поверхности плат. Достаточно высокая смачиваемость поверхности плат (98,5–99 %) достигнута в течение 15 с воздействия ультразвука для припоя ПОС61 и гальванического покрытия платы сплавом олово-висмут. Это объясняется лучшей жидкотекучестью ПОС61 по сравнению с припоем ПОИ50, а также тем, что при пайке оловянно-висмутовых покрытий не образуются интерметаллиды.

Процесс смачивания припоем ПОС61 золотых покрытий сопровождается интенсивным растворением золота в припое со скоростью, достигающей при 250 °С 4 мкм/с, и образованием преимущественно хрупких интерметаллидов AuSn₄ и AuSn₂, что приводит к снижению прочности паяного соединения, особенно при термоциклировании. При смачивании золотых покрытий припоем ПОИ50 происходит образование интерметаллидов как с оловом, так и с индием: AuIn, AuIn₂ и др., что ухудшает смачивание плат. Большое значение имеет состояние паяемых поверхностей корпуса и плат, покрытых сплавом олово-висмут. Смачиваемость гальванических матовых покрытий после длительного хранения (более 3 месяцев) значительно ухудшается вследствие процессов старения и окисления. Для восстановления паяемости рекомендовано оплавление покрытий либо в глицерине, либо с помощью инфракрасного излучения. Блестящие покрытия сохраняют паяемость в течение 12 и более месяцев.

Смачивание различных покрытий припоями в УЗ поле в значительной степени определяется кавитационным давлением. Максимальное значение кавитационного давления 6,6 кПа достигнуто на резонансной частоте

преобразователя 21,3 кГц. Изменение частоты на величину, соответствующую $\lambda/16$, то есть на 0,6 кГц, снижает кавитационное давление в припое в среднем на 55%, но при этом величина кавитационного давления составляет 2,7–2,8 кПа и достаточна для эффективного удаления окисных пленок и осуществления бесфлюсовой пайки плат.

Наилучшая смачиваемость (до 99%) достигнута для ПОС61 и оловянно-висмутовых покрытий в диапазоне температур 220–240 °С, для ПОИ50 — в пределах 97,5% в интервале температур 160–180 °С, причем смачиваемость золотых и оловянно-висмутовых покрытий примерно одинакова [8]. Оптимальная толщина фольги в соединении 120–150 мкм. При большей толщине избыток припоя вытесняется на наружную поверхность платы.

Исследование паяного шва на микроскопе МРТ-7 показало, что слой припоя в соединении непрерывный, плотный и достаточно равномерный без следов окислов или неметаллических включений. Металлографические исследования микроструктуры паяных соединений платы с корпусом подтвердили наличие равномерной границы смачивания и образование диффузионных зон. Значительная по размерам диффузионная зона, содержащая интерметаллические соединения золота, отмечена при пайке припоем ПОС61 гальванического золотого покрытия плат. Активация процесса пайки УЗ колебаниями способствует измельчению зерна интерметаллических соединений и более равномерному их распределению в диффузионной зоне.

Исследования зависимости степени смачиваемости микроплат от времени воздействия УЗ колебаний показали, что лучшее смачивание в течение 15 с получено для припоя ПОС61 и гальванического покрытия сплавом олово-висмут. Это объясняется лучшей жидкотекучестью ПОС61 по сравнению с ПОИ50, а также тем, что при пайке оловянно-висмутовых покрытий не происходит образования интерметаллидов, ухудшающих процесс смачивания, как в случае золотых покрытий. Анализ зависимости степени смачиваемости от величины усилия прижима микроплат к корпусу (рис. 5) показал, что оптимальным усилием в случае ПОС61 является 3–5 Н, для ПОИ50 — 1–2 Н. Это обусловлено различной вязкостью припоев в УЗ поле и процессами внешнего трения между жидким припоем и поверхностями микроплат и корпуса.

Оптимальными параметрами процесса УЗ бесфлюсовой пайки микроплат являются: частота колебаний 20–22 кГц; изменение частоты 1,2 кГц; температура для припоя ПОС61 220–240 °С, ПОИ50 150–170 °С; время 15–20 с; усилие прижима к корпусу (ПОС61 3–5 Н, ПОИ50 1–2 Н); толщина фольги припоя 120–150 мкм. Смачиваемость паяемых поверхностей припоем составляет не менее 97–98%.

Прочность паяных соединений плат с корпусом припоем ПОИ50, выполненных бесфлюсовой пайкой, для гальванических покрытий сплавом олово-висмут и золота составила 9,81 и 7,45 МПа, для ПОС61 — 19,8 и 8,3 МПа соответственно, что сравнимо с прочностью

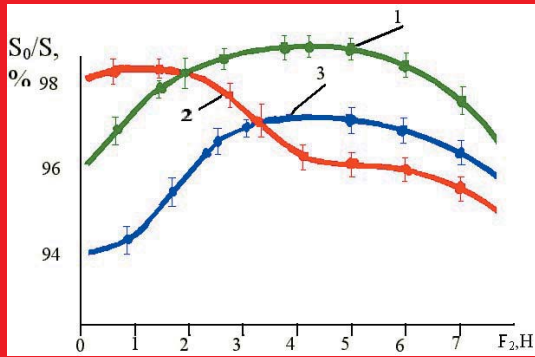


Рис. 5. Зависимости степени смачиваемости микроплат от усилия прижима к корпусу: покрытие олово-висмут, припой ПОС61 (1), припой ПОИ50 (2); покрытие золотом, припой ПОС61 (3)

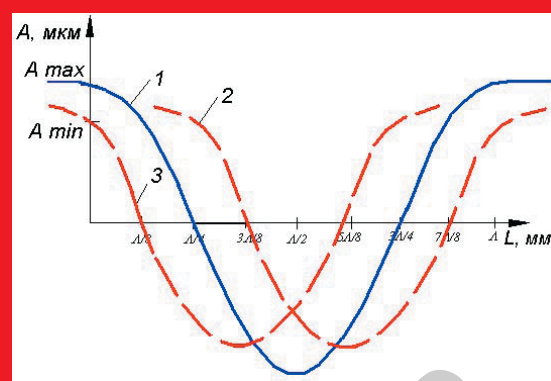


Рис. 6. Распространение УЗ волн в корпусе модуля: 1 — $f_{рез}$ 2 — $(f_{рез} + \Delta f)$ 3 — $(f_{рез} - \Delta f)$

соединений, полученных при вибрационной пайке, и в 1,5–2 раза выше для флюсовой пайки плат.

Результаты исследований влияния амплитуды и времени воздействия ультразвука на рабочие параметры СВЧ транзисторов типа 2Т3115Б, закрепленных на контактных площадках термокомпрессионной сваркой, показали, что изменение параметров транзисторов незначительно (5%), что вполне согласуется с известными данными теплового воздействия процесса пайки на рабочие параметры изделий электронной техники.

При монтаже микроплат в корпуса многофункциональных модулей УЗ волна длиной λ_1 имеет минимум колебаний примерно в середине изделия. Для того чтобы в данном месте обеспечить эффективное удаление окисных пленок с паяемых поверхностей корпуса и микрополосковой платы, необходимо подать колебания с длиной $\lambda_2 = \lambda_1/2$ с другой стороны изделия, что обеспечит в середине изделия пучность амплитуды. Для улучшения смачивания припоем паяемых поверхностей микрополосковых плат с более равномерным распределением амплитуды УЗ колебаний вдоль паяемой поверхности корпуса и образованием однородного по толщине и непрерывного паяного шва возбуждали в корпусе УЗ колебания поочередно с диаметрально противоположных сторон корпуса с длинами волн, взятыми в соотношении $\lambda_1/\lambda_2 = 1-4$ и амплитудами колебаний в соотношении $A_1/A_2 = 1-4$. Поскольку средняя акустическая мощность $P_{a,ср}$ зависит как от частоты, так и от амплитуды колебаний:

$$P_{a,ср} = 0,5 A^2 f^2 \rho c S, \quad (1)$$

где ρc — волновое сопротивление материала корпуса, S — площадь основания корпуса, то уменьшение длины волны УЗ колебаний вызовет соответственно увеличение частоты колебаний.

Часть энергии, которая переносится УЗ волнами, поглощается средой, и амплитуда звукового давления уменьшается по закону:

$$\Delta P_d = \Delta P_o e^{-\frac{d}{d_e}}, \quad (2)$$

где ΔP_o — амплитуда давления входящих в среду волн, ΔP_d — амплитуда после прохождения

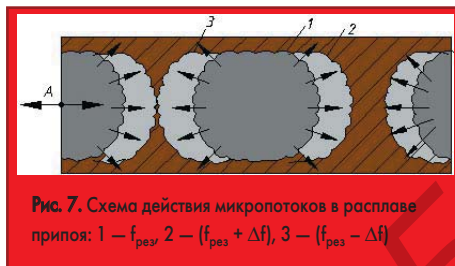


Рис. 7. Схема действия микропотоков в расплаве припоя: 1 — $f_{рез}$ 2 — $(f_{рез} + \Delta f)$ 3 — $(f_{рез} - \Delta f)$

расстояния d, d_e — расстояние, на котором амплитуда давления уменьшается в e раз. В связи с тем, что коэффициент поглощения незначителен, а расстояние распространения волны также мало, то потерями УЗ энергии при практических расчетах можно пренебречь.

Распространение бегущей УЗ волны при ее девиации приведено на рис. 6. При длине равной $\lambda/4$ и $3\lambda/4$ амплитуда колебаний равна нулю. Вследствие девиации частоты на $\lambda/8$, происходит смещение максимумов и узлов колебаний относительно длины корпуса, что позволит достигнуть высокой смачиваемости поверхности платы припоем (рис. 7).

Возбуждение УЗ колебаний возможно осуществлять и в импульсном режиме с частотой импульсов 0,5–10 Гц скважностью от 2 до 6 с целью исключения образования суперпозиций волн, приводящих к образованию узлов и пучностей амплитуды смещений в припое, а также значительных циклических напряжений в паяемом изделии. Это обеспечивает одновременное разрушение окисдных пленок по всей паяемой поверхности микрополосковой платы за счет развития однородного кавитационного процесса в расплавленном припое и создает условия для более полного смачивания припоем поверхности платы между нею и основанием корпуса без применения флюсов. В итоге снижено тепловое сопротивление контакта плата-корпус и устранена опасность развития коррозионных процессов, что в конечном счете способствовало повышению надежности изделия.

На частоте УЗ колебаний, подаваемых от одного генератора 22 кГц, длина волны λ_1 составляла 0,28 м, а амплитуда колебаний волновода 20 мкм. Частота другого генератора составляла 44 кГц, длина волны λ_2 0,14 м, а амплитуда колебаний 15 мкм. При времени пайки 10 с смачивание паяемых поверхностей припоем составило 98–99%. Изделия при испытании выдержали до 10 термоциклов.

Эффективность процесса УЗ пайки микроплат заключается в повышении качества паяных соединений за счет улучшения смачивания припоем паяемых поверхностей плат, образования однородного по толщине и непрерывного паяного шва, исключения использования флюса. Достигнуто увеличение эксплуатационной надежности и долговечности изделий за счет уменьшения теплового сопротивления контакта плата-корпус и увеличения теплоотвода от элементов платы, и как результат, повышения в 3–5 раз стойкости изделия к циклическим, механическим и тепловым нагрузкам.

Литература

1. Яшин А. А. Конструирование микроблоков с общей герметизацией. М.: Радио и связь, 1985.
2. Гуськов Г. Я., Блинов Г. А. Газаров А. А. Монтаж микроэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1986.
3. Филатов И. Н., Бакрунов О. А., Панасенко П. В. Микроэлектронные СВЧ-устройства. М.: Высшая школа, 1987.
4. Цыкин А. В., Яковлев Г. А. Повышение надежности несогласованных соединений микрополосковых плат с корпусами СВЧ модулей при циклических температурных воздействиях. Обзоры по электронной технике. Сер.: Технология, организация производства и оборудование. Вып.12(1476). М.: ЦНИИ Электроника, 1989.
5. Доровских С. Применение технологии поверхностного монтажа в производстве гибридно-интегральных модулей СВЧ // Компоненты и технологии. 2006. № 7.
6. Бейль В. И., Отмахова Н. Г., Сажин И. И. Групповая пайка микрополосковых плат на металлические основания // Электронная техника. Сер. 10. 1986. Вып. 3 (387).
7. А. с. 89426 СССР. МКИЗ В 23 К 1/06. Способ ультразвуковой пайки и лужения / М. Д. Тявловский, В. Л. Ланин, Ю. М. Зак, В. Н. Копылов. № 2934478/25-27; Заявл. 29.05.80. Опубл. 30.12.81. Бюл. № 48 // Открытия. Изобретения. 1981. № 48.
8. Ланин В. Л. Активация монтажа СВЧ микросборок и многофункциональных модулей ультразвуковой и электромагнитной энергией // Современные средства связи: Материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф. Нарочь. 2004. № 2(18)/2.