

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 приемо-передающей аппаратуре телекоммуникационных линий, авиационной и космической аппаратуре. Преимущественной формой конструкции модулей СВЧ является планарная, основной конструкционный элемент ячейки — рамка, а герметичного блока — корпус [1]. Наиболее теплонпряженные 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 микроэлектронных устройствах СВЧ-диапазона 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 мик-

рборок на основании, а конструирование блока выполнять по принципу непрерывной схемы. 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 многократная пайка 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 металлоэлектрический спай. Соединители герметизируются пайкой, электрические соединения между СВЧ-микросборками и соединителем осуществляются переключками 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 массо-габа-

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

ритных 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-

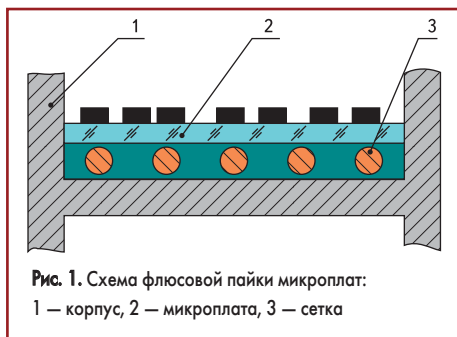


Рис. 1. Схема флюсовой пайки микроплат:
1 — корпус, 2 — микроплата, 3 — сетка

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 перспективны 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 платы, 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,

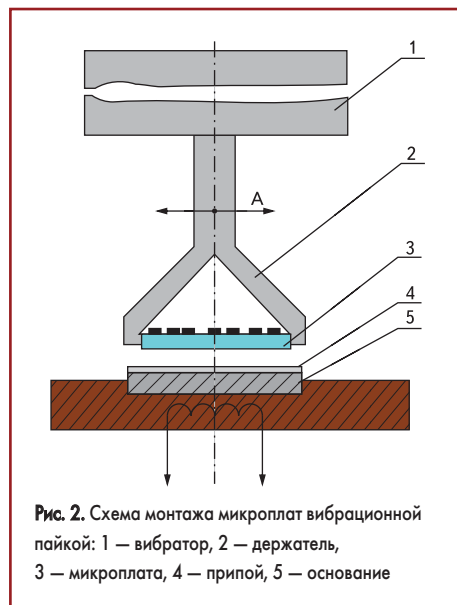


Рис. 2. Схема монтажа микроплат вибрационной пайкой: 1 — вибратор, 2 — держатель, 3 — микроплата, 4 — припой, 5 — основание

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

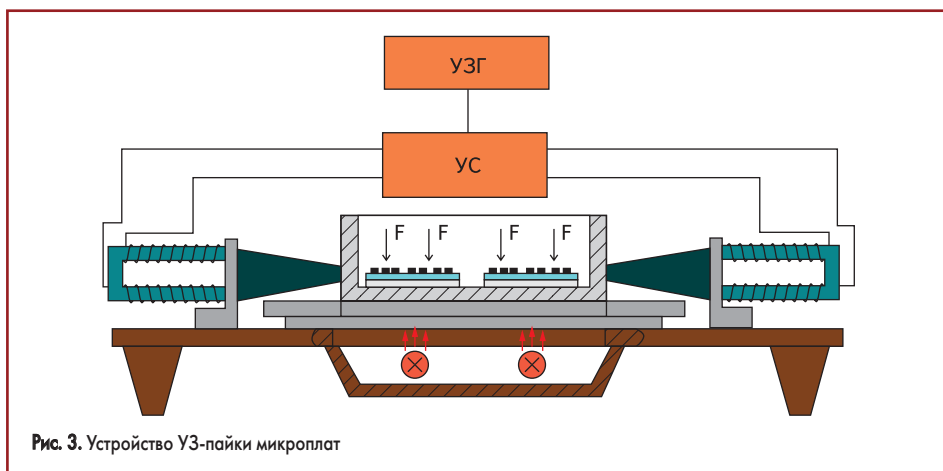


Рис. 3. Устройство УЗ-пайки микроплат



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 измерялась 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 оксидных 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 измерили 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 $AuSn_4$ и $AuSn_2$, 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: $AuIn$, $AuIn_2$ 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 припоем 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.

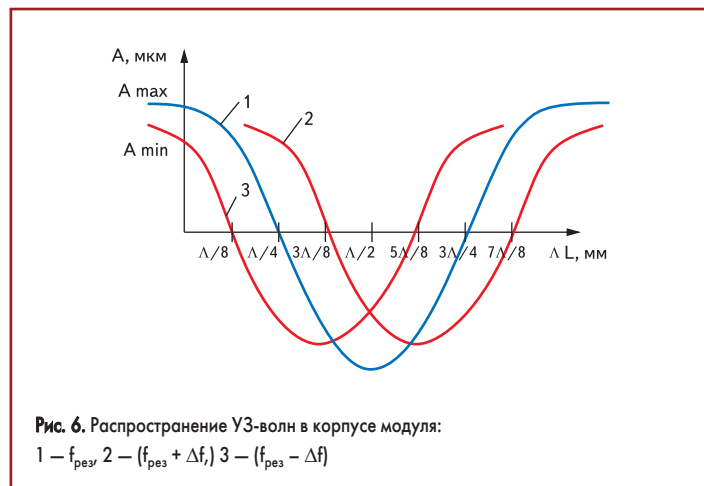
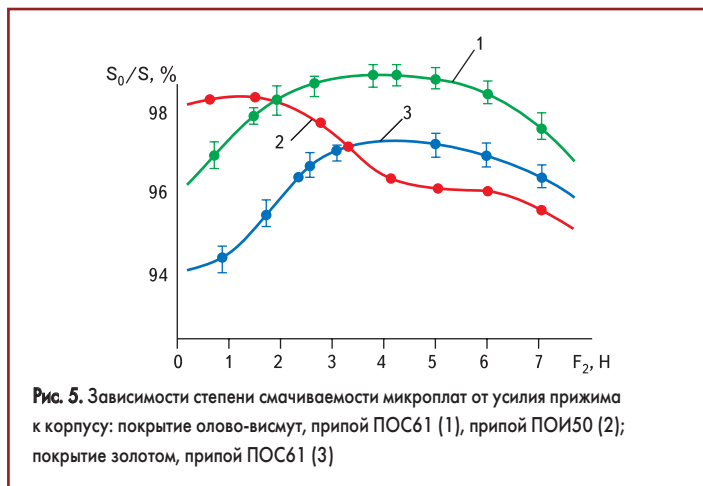
Наилучшая смачиваемость (до 99%) достигнута для ПОС61 и оловянно-висмутовых покрытий в диапазоне температур 220–240 °С, для ПОИ50 — в пределах 97,5% в интервале температур 160–180 °С, причем смачиваемость золотых и оловянно-висмутовых покрытий примерно одинакова [8]. Оптимальная толщина фольги в соединении — 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 оксидов 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 у 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



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 $P_{a,cp}$ зависит как от частоты, так и от амплитуды колебаний:

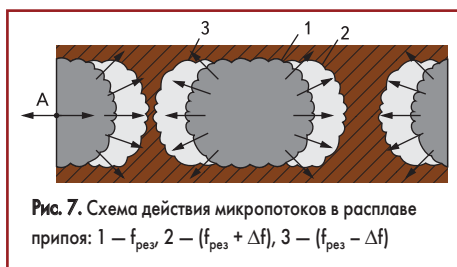
$$P_{a,cp} = 0,5 A^2 f^2 \rho c S, \quad (1)$$

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



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 звуковода — 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.