

Бесфлюсовая ультразвуковая пайка в электронике

Экологические проблемы пайки в электронике вызвали повышенный интерес к процессам и устройствам бесфлюсовой ультразвуковой пайки и металлизации неметаллических материалов. Для формирования качественных соединений необходим выбор припоев и оптимизация режимов процесса.

Владимир Ланин

vlanin@bsuir.unibel.by

Проблемы бесфлюсовой пайки в электронике

Проблемы пайки в современной электронике приобретают особую актуальность по целому ряду причин:

- технологические процессы формирования паяных соединений при монтаже электронных сборок не отличаются высокой надежностью. Недостаточный уровень автоматизации отдельных операций приводит к тому, что 50-80% всех отказов в аппаратуре происходит вследствие дефектов соединений, при этом стоимость обнаружения и исправления отказа на этапе сборки обходится в 100 раз дешевле, чем при испытаниях аппаратуры [1];
- возрос интерес к экологическим аспектам пайки: замене смолосодержащих флюсов, требующих отмычки, на водосмываемые или неудаляемые; а также замене токсичного свинца на другие компоненты в составе припоев [2].

Поскольку остатки флюса после пайки сохраняют некоторый уровень коррозионной активности, их необходимо удалить, чтобы гарантировать адекватную надежность изделий. Традиционные методы очистки с использованием хлорированных фторуглеродов и углеводородных растворителей ввиду их экологической опасности теперь строго ограничены. Поток сточных вод от водных процессов очистки потенциально загрязняет ресурсы питьевой воды.

Альтернативной техникой пайки, заменяющей химическую активность флюса для удаления оксидов, является энергия в форме ультразвуковых (УЗ) волн. Энергия УЗ вызывает в жидком припое кавитацию, которая удаляет оксидный слой на поверхности основного металла. Хотя УЗ активация успешно заменяет функцию удаления оксида флюсом, она не может защитить очищенную поверхность до пайки, а также изменить поверхностное натяжение расплавленного припоя, чтобы увеличить его растекание и капиллярное проникновение [3].

Первые упоминания об УЗ пайке относятся ко времени перед второй мировой войной в Германии: процесс бесфлюсовой пайки в 1936 г. и выдача немецко-

го патента на УЗ паяльник в 1939 [4]. Интерес к УЗ пайке в промышленных масштабах проявился в начале 1950-х как к средству соединения труднопаяемых металлов: алюминия, его сплавов и нержавеющей стали с помощью УЗ паяльников фирмы Mullard [5]. В 1960-х УЗ энергия была впервые использована для формирования соединений металлов с керамикой и ферритами [6, 7]. УЗ техника получила крупномасштабное производственное использование в течение 1970-х для соединения алюминиевых труб кондиционеров [8]. Затем настольные УЗ ванны были применены для горячего покрытия припоем выводов компонентов для разнообразных миниатюрных электронных устройств [9-11], а УЗ паяльники — для металлизации стеклокерамических материалов [12]. Применение современных электронных источников УЗ колебаний делает пайку надежным, экологически чистым процессом, исключающим применение флюсов.

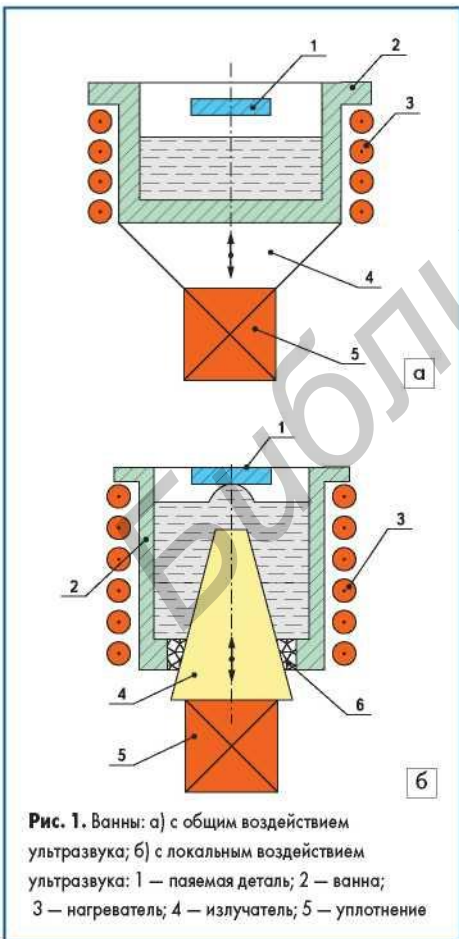
При разработке бессвинцовых припоев, пригодных для УЗ пайки изделий электроники, к настоящему времени исследованы двойные сплавы на основе олова: Sn-Zn [13], Sn-Bi [14], тройные сплавы: Sn-Bi-In, Sn-Bi-Zn, Sn-In-Ag, Sn-Sb-Zn, Sn-Sb-Ag [15] и четвертной сплав: Sn-Zn-In-Sb [13], которые имеют температуры плавления в интервале 135-220 °С. Однако добавки Ag и In дорогостоящи, а Zn образует при пайке на воздухе большое количество шлака. В большинстве этих припоев образуются интерметаллиды, снижающие сопротивление усталости.

Флюсовая пайка подложек гибридных интегральных схем и микроплат в корпусе микросборок легкоплавкими припоями имеет существенные недостатки, обусловленные наличием остатков флюса. При пайке важно обеспечить сплошной контакт поверхности подложки и металлического основания, так как пустоты и или флюсовые включения резко снижают теплоотвод от микросхемы к корпусу, ухудшают прочность соединений. Кроме того, флюсовые включения являются причиной коррозии, которая может привести к отказу микросборки. Альтернативой флюсовой пайке является УЗ пайка [16].

ри изготовлении электронных и функциональных элементов, таких как монолитные конденсаторы и сборки, пьезоэлектрические преобразователи, вариконды и электреты, металлизацию контактных поверхностей выполняют пастами серебра, палладия, платины или других металлов. УЗ металлизация более дешевыми припоями позволит экономить драгоценные металлы, повысить производительность процессов и качество контактных соединений в электронных компонентах.

Процессы и установки ультразвуковой пайки

Для процессов бесфлюсовой пайки изделий электроники и электронныхборок легкоплавкими припоями используют УЗ ванны с возбуждением всей массы припоя (рис. 1а) и с локальным воздействием ультразвука с помощью встроенного излучателя в дне ванны (рис. 1б). В первом случае можно активировать большую поверхность изделия, а во втором - сконцентрировать УЗ энергию в небольшом объеме и снизить окисление припоя в ванне. При выборе УЗ излучателя во втором случае необходимо учитывать, что в ступенчатом концентраторе имеется значительная концентрация напряжений в месте стыка ступеней, приводящая к быстрому разогреву и поломке. Наименьшие напряжения характерны для экспоненциального концентратора, однако для получения высокого коэффициента усиления необходимо иметь значительное отношение площадей поперечного сечения основания и рабочего торца. Концентратор типа



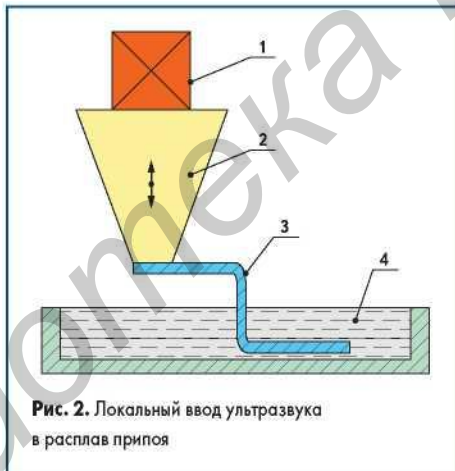
Фурье имеет плавное изменение напряжений, сравнительно высокий коэффициент усиления и уравнение формы в виде [17]:

$$y = 22,845 + 0,209x - 5,548x^2 + 1,958x^3, (1)$$

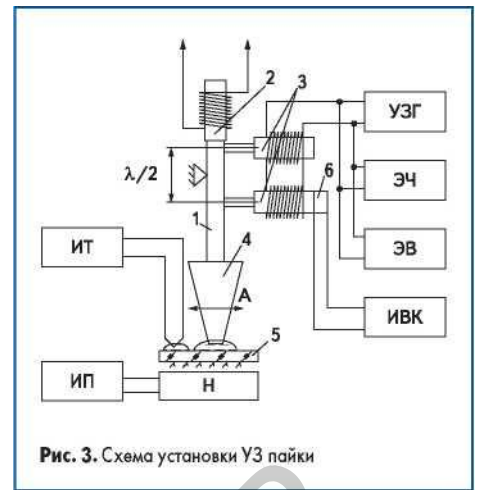
где y — диаметр сечения (мм), x — расстояние от нулевой точки.

Для уменьшения потерь УЗ энергии использовано фторопластовое уплотнение концентратора с ванной лужения, что позволило также снизить передачу тепловой энергии от припоя к магнитоstrictionному преобразователю.

Для локального ввода колебаний в расплав припоя (рис. 2) применяют поршневые излучатели, удовлетворяющие отношению $L_{изл}/D < 1,5-1,8$, где $L_{изл}$ — длина излучающей поверхности, а D — диаметр волновода, что обеспечивает режим излучения плоской волны. Излучатель представляет собой пластину в форме прямоугольника, жестко связанного с торцом конического волновода. Толщина излучателя выбирается из соотношения $h/A < 0,1-0,15$, где A — длина УЗ волны, что позволяет рассматривать его как сосредоточенную массу [18]. Акустическая система состоит из преобразователя 1, волновода 2 и излучателя 3. Деталь погружается на расстояние 3-5 мм от поверхности излучателя в припой 4.



Для УЗ пайки и металлизации припоями разработана экспериментальная установка [19] (рис. 3), состоящая из генератора УЗ (УЗГ), акустической системы, нагревательного устройства (Н), электронного частотомера (ЭЧ), вольтметра (ЭВ), измерителя вибраций (ИВК). Источником продольных колебаний, распространяемых вдоль волновода, является магнитоstrictionный преобразователь 2, присоединенный соосно к волноводу 1 и излучателю 4. Для возбуждения колебаний, параллельных обрабатываемой поверхности 5, использовали два преобразователя 3, присоединенные к волноводу перпендикулярно на расстоянии $\lambda/2$. Непрерывный контроль вибраций осуществляется с помощью пьезоэлектрического датчика амплитуды 6. Температура нагревательного устройства стабилизируется с помощью источника питания ИП и контроллера температуры ИТ.

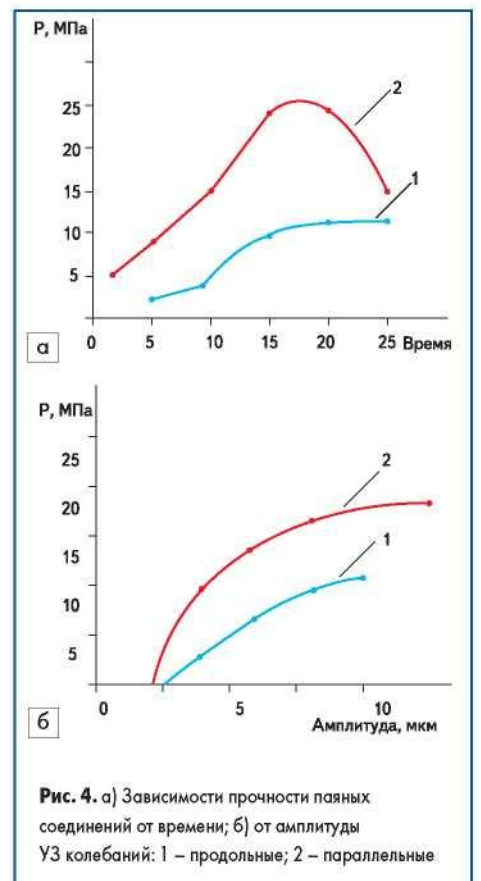


Параметры процесса: частота УЗ колебаний 42 ± 1 кГц, выходное напряжение генератора 50-60 В, что соответствует амплитуде УЗ вибраций 12-15 мкм, температура нагрева — 230 ± 5 °С.

Для оценки прочности паяных соединений применяют разрывные машины с усилием до 1 МН. Для повышения точности измерений усилия отрыва, а также исключения ударных нагрузок соединения нагружают в два этапа: предварительный со скоростью 1,5-2,0 кН/мин и основной со скоростью 8-10 кН/мин с помощью специального приспособления с тарированной пружиной.

Прочность паяных соединений с алюминиевыми сплавами при параллельном направлении колебаний выше на 10-12 МПа, чем при продольном, вне зависимости от времени воздействия [20] (рис. 4).

Высокая прочность соединений (более 20 МПа) достигается при длительности воз-



действия колебаний 15-20 с. При меньшем времени вследствие неполного разрушения поверхностных пленок смачивание поверхности материала недостаточное. При большем времени происходит уменьшение прочности паяного соединения за счет эрозии основного материала и окисления припоя. Максимальная прочность паяных соединений соответствует амплитуде параллельных УЗ колебаний 10-12 мкм и составляет 24 МПа при времени 15±1 с.

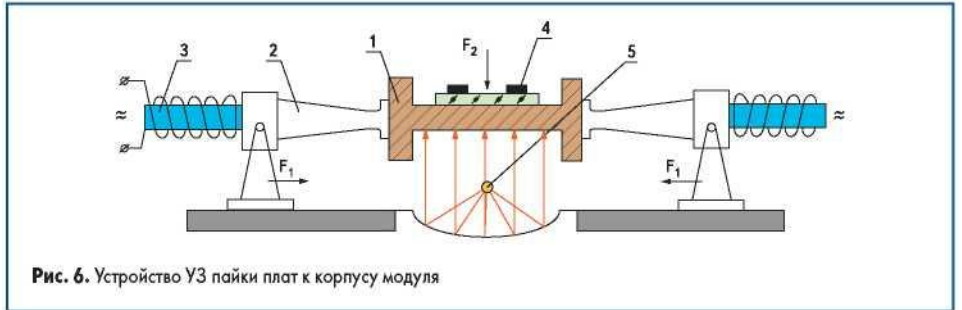
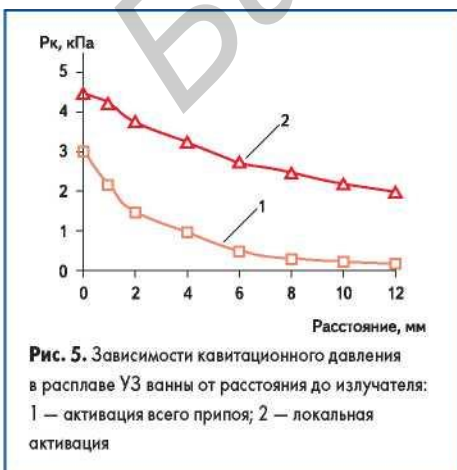
Амплитуда УЗ колебаний 3±0,5 мкм является пороговой для кавитационных процессов в расплаве, ниже которой отсутствует смачивание, адгезия припоя к поверхности материала и химическое взаимодействие между ними. При амплитуде более 15 мкм прочность снижается, поскольку возникающие динамические импульсы вызывают деградацию приповерхностных слоев расплава припоя и его интенсивное окисление. При продольных колебаниях значительная часть энергии передается в материал, вызывая его нагрев и разрушение, а при параллельных в большей степени распространяется в припой вдоль паяемой поверхности и расходуется на кавитационные явления в зоне взаимодействия. Дополнительно улучшается процесс смачивания материала припоем за счет эффекта натирания.

Ультразвуковое лужение может быть использовано для подготовки к пайке электронных компонентов, утративших паяемость после длительного хранения. Это позволит отказаться от применения активных флюсов, механической зачистки, повысить производительность труда и обеспечить отличную паяемость (табл. 1).

Таблица 1. Паяемость электронных компонентов

| Тип компонента | Время обработки | Время паяемости | Тип паяемости |
|-----------------|---------------------|-----------------|--------------------|
| Резисторы Axial | Канифольный флюс | 10-12 | Удовлетворительная |
| Конденсаторы КМ | Активированный флюс | 1-2 | Хорошая |
| Диоды Axial | УЗ лужение | 0,2-0,4 | Отличная |

При УЗ лужении в ваннах с общим возбуждением массы расплава интенсивность кавитации максимальна на дне и нелинейно падает с увеличением расстояния до дна, что необходимо учитывать для элементов с выводами размером 15-20 мм. При локальной УЗ активации



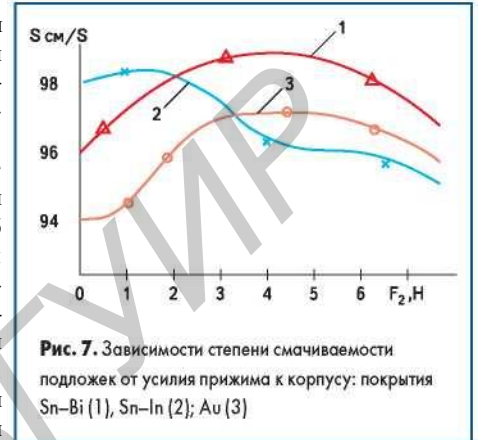
зации в зоне лужения наблюдается относительно однородная интенсивность кавитации (рис. 5). Управление процессом УЗ лужения электронных компонентов может быть автоматизировано на базе персонального компьютера и технических средств контроля.

Для УЗ бесфлюсовой пайки микроплат из поликора размером 48x60 мм с покрытием золотом 3 мкм или сплавом олово-висмут 6 мкм в корпус микросборки размером 110x54x20 мм из дюралюмина Д16Т с многослойным гальваническим покрытием: никель 15, медь 6 и олово-висмут 9 мкм применен припой Sn-In [21]. Корпус микросборки 1 закрепляется между двумя, расположенными соосно друг против друга, акустическими системами. Для надежной передачи акустической энергии корпусу микросборки волноводы 2 акустических систем прижаты к нему усилиями F1, обеспечивающими жесткий контакт всех звеньев (рис. 6).

Напряжение УЗ частоты от двух генераторов поступало на обмотки магнитоострикционных преобразователей 3. Микроплата через прокладку припоя прижималась к корпусу усилием F2. Корпус нагревался двумя инфракрасными лампами 5. В случае совпадения частот обоих генераторов суперпозиция УЗ продольных волн, возбуждаемых в корпусе, вызывает появление узла колебаний в центре корпуса. В реальных условиях неизбежно некоторое несовпадение частот колебаний, постоянное смещение узла колебаний, что затрудняет смачивание микроплаты припоем.

Для обеспечения эффективного разрушения окисных пленок и равномерного качественного смачивания всей поверхности микроплаты частоту УЗ колебаний изменяли на величину, соответствующую 1/8 при интенсивности звукового давления (18-20) 10⁴Вт/м² на средней частоте работы преобразователя 20 кГц и амплитуде колебаний 10-12 мкм. Наилучшие характеристики смачивания получены для гальванического покрытия сплавом олово-висмут.

Это объясняется лучшей жидкотекучестью припоя Sn-In по сравнению с оловянно-свин-



цовым, а также отсутствием интерметаллидов, ухудшающих процесс смачивания, как в случае золотых покрытий. Зависимости степени смачиваемости подложек от величины усилия прижима подложки к корпусу показаны на рис. 7. Анализ зависимостей показывает, что оптимальным усилием прижима подложек является 2-5 Н, что обусловлено минимальной вязкостью припоев и процессами внешнего трения между жидким припоем и поверхностями подложки и корпуса.

Ультразвуковая металлизация неметаллических материалов

Для металлизации стеклокерамических материалов, состоящих из стекла в виде группы оксидов SiO₂, BaO, PbO, а также Na₂O, K₂O, TiO₂ в количестве 20-30%; и керамики на основе SrTiO₃, CaTiO₃ и TiO₂, используемой в электронике для изготовления монолитных конденсаторов постоянной емкости как в обычном исполнении, так и в чиповом варианте, применены припои на основе Sn, не содержащие Pb и имеющие добавки металлов: Zn, In, Sb, Ag, а также стандартные припои, имеющие в своем составе Pb. Механическая прочность паяных соединений различных припоев со стеклокерамическими материалами зависит от состава припоя [19] (табл. 2).

Таблица 2. Механическая прочность паяных соединений

| Состав припоя, % | Температура плавления, С | Прочность, МПа |
|-----------------------------|--------------------------|----------------|
| Sn-100 Sn-10, Sb-2, ост. Pb | 232-268-285 | 2,5 3,0 |
| In-100 | 155 | 3,5 |
| Sn-50, In-50 | 117 | 5,0 |
| Sn-38, Zn-4, ост. Cd | 150-165 | 5,2 |
| Sn-90, Zn-10 | 200 | 8,0 |
| Sn-80, Zn-20 | 200-250 | 10,0 |
| Zn-10, In-10, Sb-2, ост. Sn | 175-185 | 18,2 |

Структура обычного оловянно-свинцового припоя типа Sn-Pb представляет собой механическую смесь зерен свинца и олова различной величины, которые мягки и пластичны, имеют тетрагональную объемно-центрированную и гранецентрированную кубические решетки. Оба металла относятся к группе инертных, то есть имеют невысокое химическое сродство и слабую адгезионную активность к паяемым материалам. При УЗ пайке такой припой испытывают повышенное окисление и дают низкую прочность соединений. Добавки Ag и Sb повышают твердость и уменьшают зернистость. Кристаллы Sb имеют структуру абразивных зерен, что увеличивает абразивное воздействие на оксидные пленки и в некоторой степени увеличивает механическую прочность паяных соединений (рис. 8).

В составе припоев эвтектической системы Sn-Zn присутствуют кристаллы цинка иголь-

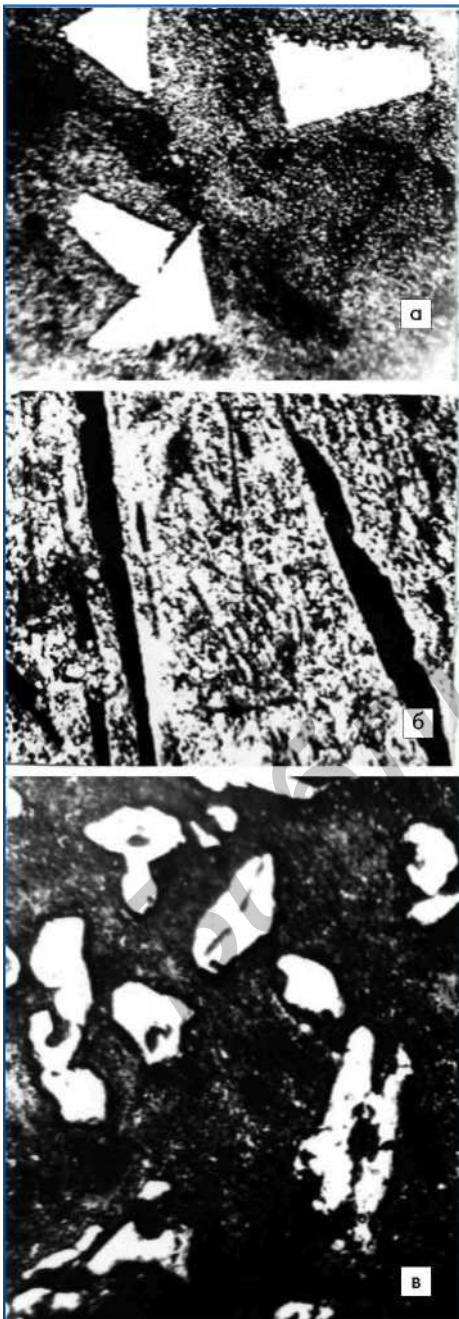


Рис. 8. Микроструктура припоев: а) Sn-Sb; б) Sn-Zn; в) Sn-In

чатой формы и высокой твердости, нерастворимые в олове, что значительно увеличивает абразивное воздействие, а также число зародышей кавитации при воздействии УЗ энергии. Zn относится к группе активных диффузионно-подвижных металлов и вступает в химическую связь с большинством паяемых металлов. Эвтектическая система Sn-In представляет собой механическую смесь зерен индия и олова. Индий повышает смачивающую способность припоя, поскольку он стоек к окислению, является благородным металлом и обладает высокой пластичностью. Однако его легкоплавкость и высокая стоимость затрудняют его использование для пайки. При приготовлении специальных припоев хорошие результаты получены при УЗ перемешивании легирующих добавок за счет микропотоков, что обеспечивает мелкозернистую структуру припоя и равномерное распределение отдельных компонентов по всему объему. Величина УЗ энергии, передаваемой в ванну с припоем, зависит от коэффициента пропускания расплава [21]:

$$\tau_{\text{проп}} = \frac{z_B / z_{\text{ПП}}}{(z_B + z_{\text{ПП}})^2}, \quad (2)$$

где z_B , $z_{\text{ПП}}$ — акустические сопротивления волновода и расплава припоя, рассчитываемые как $z = \rho c$.

Оценка коэффициента пропускания осуществлена с помощью экспериментальной установки (рис. 9). УЗ колебания от генератора 1 поступали на преобразователь 2, возбуждающий упругие механические колебания в волноводе 3, погруженном в расплав припоя. Колебания воспринимались волноводом 4 и соединенным с ним пьезоэлектрическим датчиком 5.

Напряжение, развиваемое датчиком, регистрировалось вольтметром 6. Волноводы 3, 4 находились на строго определенном расстоянии друг от друга в ванне припоя 7. По величине электрического напряжения, возбуждаемого в пьезоэлементе, судили об УЗ энергии, передаваемой припоем. Исследования, выполненные для различных припоев при расстоянии между волноводами 15 мм и резонансной длине волновода $\lambda/2$, приведены в табл. 3.

Как видно, величина УЗ энергии, передаваемой в расплавы Sn-Zn и Zn-Al, выше, чем в Sn-Pb, что объясняется особенностями микроструктуры этих припоев. Ввиду их высокого акустического сопротивления коэффи-

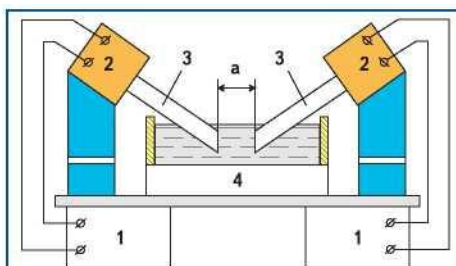


Рис. 9. Схема установки для оценки коэффициента пропускания

Таблица 3. Коэффициенты пропускания УЗ энергии расплавами припоев

| Состав, мас. % | Температура припоя, С | Напряжение, регистрируемое вольтметром, В | Коэффициент пропускания |
|----------------|-----------------------|---|-------------------------|
| 60 Sn - 40 Pb | 250 | 16 | 0,84 |
| 96,5 Sn-3,5 Ag | 250 | 18 | 0,85 |
| 100Sn | 250 | 19 | 0,85 |
| 91 Sn - 92 Zn | 250 | 24 | 0,9 |
| 95Zn-5Al | 440 | 50 | 0,95 |

циент пропускания составляет 0,90-0,95. Величина УЗ энергии, передаваемой расплаву припоя, резко снижается с увеличением расстояния между волноводами и почти не зависит от температуры припоя, что позволяет использовать широкие температурные интервалы для процессов УЗ пайки и металлизации.

Прочность соединений со стеклокерамикой припоев систем Sn-Zn и Sn-Zn-In-Sb при оптимальных режимах УЗ металлизации в равной степени зависит от степени шероховатости поверхности стеклокерамики (рис. 10а). С уменьшением шероховатости поверхности прочность соединений снижается, что может быть объяснено уменьшением площади контакта. В области более грубого микрорельефа возникают усталостные процессы, появляются локальные микротрещины во впадинах микронеровностей, являющихся хорошими концентраторами напряжений.

Максимальное значение прочности соответствует кавитационным давлениям в припое от 1,5 до 2,5 кПа (рис. 10б). При кавитационном давлении менее 1,0 кПа наблюдается недостаточное смачивание, неравномерное заполнение всех микротрещин жидким припоем.

Одним из структурно-чувствительных методов исследования соединений с керамикой, позволяющим косвенно подтвердить наличие переходной зоны, является метод измерения тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$).

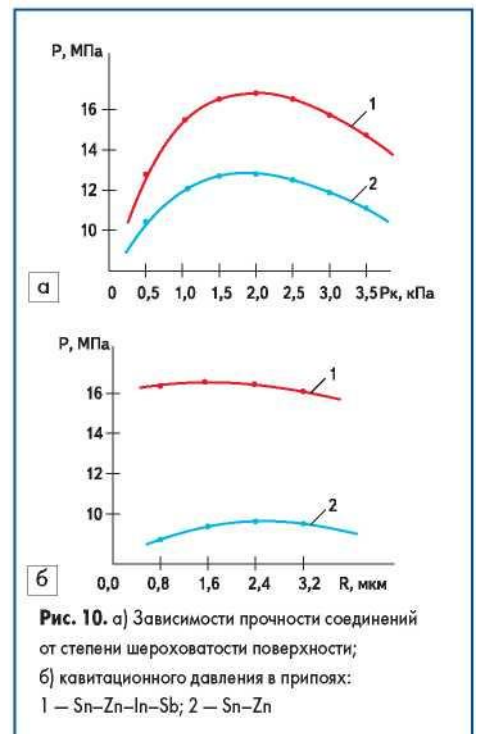


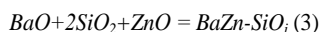
Рис. 10. а) Зависимости прочности соединений от степени шероховатости поверхности; б) кавитационного давления в припоях: 1 — Sn-Zn-In-Sb; 2 — Sn-Zn

Образцы стеклокерамики, сошлифованные на алмазном диске до толщин 2,0; 1,5; 1,0; 0,8; 0,6; 0,4 мм, металлизировались припоем системы Sn-Zn-In-Sb при температуре 270 ± 5 °С в течение 10 с. Величины емкости и добротности образцов измеряли на частоте 10 МГц с помощью стандартных приборов, а τ_g 8 был рассчитан по известной методике.

С уменьшением толщины стеклокерамического образца емкость образцов изменилась незначительно, однако τ_g 8 возрос почти в 2 раза, что может указывать на наличие переходной зоны.

Микроструктурное исследование паяных соединений, проведенное на электронном микроскопе ЭММА-2 с увеличением в 1 000 раз и на сканирующем электронном микроскопе MINI SEM с увеличением в 700 раз, показало, что вдоль поверхности стеклокерамики наблюдается тонкая зона интерметаллида размером до 3 мкм, образовавшегося в пограничном слое припоя. Отмечено смачивание частицами индия поверхности стеклокерамики, которые, располагаясь вдоль границы со стеклокерамикой, увеличивают тем самым прочность соединений. В то же время ярко выраженная диффузионная зона между припоем и стеклокерамикой, а также проникновение припоя в глубь стеклокерамики не отмечены.

Рентгеноструктурный анализ соединений со стеклокерамикой, проведенный на дифрактометре ДРОН-2 с использованием излучения СиКа, позволил выявить ряд особенностей механизма образования соединения. При анализе рентгенограмм чистых исходных материалов (стеклокерамики и припоя) отмечены рефлексы, соответствующие двойным оксидам $2\text{PbO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2$, образовавшимся в процессе спекания стеклокерамической массы, а также наличия оксидов цинка ZnO и ZnO_2 в припое. При расшифровке рентгенограмм паяных соединений выявлены рефлексы, соответствующие сложным интерметаллидам $\text{Pb}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$, BaZnSiO_4 , а также оксиду In_2O_3 , что свидетельствует об окислительном характере протекающих химических реакций. Анализ химического состава стеклокерамики показывает, что наименьшей устойчивостью в аморфной фазе стеклокерамики отличаются оксиды свинца и бария. Однако взаимодействие между этими оксидами и компонентами припоя будет протекать только в том случае, если оно будет иметь термодинамическую разрешенность. Термодинамический расчет наиболее вероятных путей получения интерметаллидов $\text{Pb}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ и BaZnSiO_4 , проведенный по уравнению Гиббса-Гельмгольца, показал, что изобарный потенциал химической реакции $AZ = -3,7$ ккал и протекание химических реакций образования сложных интерметаллидов возможно при температуре выше 400 °С:



При воздействии энергии УЗ колебаний на расплавленный припой за счет развития интенсивных кавитационных явлений на границе со стеклокерамикой возникают локальные тепловые микрополя, температура в ко-

торых может достигать до 1000 °С, также за счет интенсивной турбулизации припоя микротоками образуются сложные оксидные соединения в результате окислительных реакций между двойными оксидами аморфной фазы стеклокерамики, отличающимися меньшей термодинамической устойчивостью, и оксидами диффузионно-подвижного компонента припоя — цинка следующего типа:



Выводы

Активация энергией УЗ колебаний позволяет осуществлять бесфлюсовую пайку и лужение большинства металлов и сплавов, применяемых в электронике. Бесфлюсовая пайка более экономична, поскольку такие операции, как флюсование и очистка, требующие затрат времени и материалов, исключаются. Бесфлюсовая пайка в ряде случаев является необходимым условием внутреннего монтажа и герметизации микроэлектронной аппаратуры. С помощью УЗ пайки и металлизации соединяют такие труднопаяемые материалы, как никелевые, алюминиевые и магниевые сплавы, а также неметаллические материалы: керамику, стекло, ферриты. Это создает возможность экономии драгоценных металлов, наносимых на диэлектрические поверхности электронных компонентов в качестве металлизации.

Колебания, параллельные обрабатываемой поверхности, для процессов УЗ пайки и металлизации, особенно при локальном введении энергии в зону взаимодействия, предпочтительнее с точки зрения повышения прочности паяных соединений, обеспечения высокой стабильности процессов и уменьшения механического воздействия на обрабатываемые изделия. Процесс формирования соединений с неметаллическими соединениями имеет термодинамический характер, на первом этапе воздействие УЗ энергии интенсифицирует смачивание материалов, а затем за счет термических эффектов способствует протеканию химического взаимодействия между компонентами припоя и аморфной фазы стеклокерамики.

Применение бессвинцовых припоев с добавками Zn, In, Ag увеличивает адгезионную активность припоев и снижает их окисление при УЗ пайке.

Литература

- Juddi M., Brindley K. Soldering in Electronics Assembly. N.Y.: Marcel Dekker, 1999.
- Lead-Free Soldering in Electronics / Ed. By K. Sugauma. N.Y.: Marcel Dekker, 2004.
- С. П. Кундас, В. Л. Ланин, М. Д. Тявловский, А. П. Достанко. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники / Минск: Бестпринт, 2002.
- Crawford A.E. Ultrasonic Engineering. N.Y.: Academic Press, 1955.
- Crawford A.E. Ultrasonic Soldering Iron // Metallurgia, 1951. V. 44. № 9.
- Захаров К. Д. Ультразвуковая пайка стекла, керамики и ферритов. - В кн.: Применение

ультразвука в технологии машиностроения. М.: ЦИНТИ, 1960.

- Ганрю В. В. Ультразвуковое лужение и пайка керамики // Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности. 1961. №9.
- Antonevich J. N. Fundamentals of Ultrasonic Soldering // Welding J. 1976. V. 55. № 7.
- Denslow G. Ultrasonic Soldering // Wire J. 1976. V. 9. № 9.
- Graff K. Macrosonics in Industry: Ultrasonic Soldering // Ultrasonics. 1977. V. 15. № 2.
- Fuch J. F. Ultrasonics in Electronics Soldering Applications // Electron. Packaging and Prod., 1979. V. 19. № 11.
- Тявловский М. Д., Ланин В. Л. Ультразвуковая пайка и металлизация неметаллических материалов в технологии РЭА // Перспективные направления в технологии радиоаппаратостроения. Материалы семинара. Л.: ЛДНТП, 1979.
- Тявловский М. Д., Ланин В. Л. Исследование физико-механических свойств и структуры металлических спаев со стеклокерамическими материалами, полученных ультразвуковой металлизацией // Электронная техника. Сер. 6. 1981. Вып. 4 (141).
- K. Kago, K. Suetsugu, S. Hibino, T. Ikary. Novel Ultrasonic Soldering technique for Lead-Free Solders // Material Trans. 2004. V. 45. № 3.
- Wood E.P., Nimmo K.L. In Search of New Lead-Free Electronic Solders // Electron. Mater. 1994. V. 23. № 8.
- Клубович В. В., Тявловский М. Д., Ланин В. Л. Ультразвуковая пайка в радио- и приборостроении. Минск: Наука и техника. 1985.
- В. Л. Ланин, В. М. Бондарик, И. Н. Чернышев, А. Ч. Черепович. Пайка алюминиевых телескопических соединений // Радиопромышленность. 1994. № 3.
- Свергунов В. Ф., Ланин В. Л., Чернышевич И. Н. Локальное ультразвуковое лужение выводов радиоэлементов // Электронная промышленность. 1994. № 6.
- Lanin V. L. Ultrasonic Soldering in Electronics // Ultrasonics Sonochemistry. 2001. № 8.
- Ланин В. Л., Тявловский М. Д. Влияние вида ультразвуковых колебаний на прочность спаев со стеклокерамическими материалами // Вестн АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1983. № 4.
- Ланин В. Л., Тявловский М. Д. Исследование ультразвуковой бесфлюсовой пайки подложек гибридных интегральных схем в корпусе микросборок // Докл. АН БССР. 1982. Т. 26. № 11.
- Lystrup F. Measurement of the Ultrasonics Effect in an Ultrasonic Solder Bath // Welding J., 1976. V. 55. № 10.
- Inava M., Yamakawa K., Iwase N. Solder Bump Formation Using Electroless Plating and Ultrasonic Soldering // IEEE Trans. on Comp., Hybrids, and Manuf. Technology. 1990. V. 13. № 1.
- Vianco P.T., Hosking F.M., Rejent J.A. Ultrasonic Soldering for Structural and Electronic Applications // Welding J. 1996. V. 75. № 11.
- Faridi H. R., Devletian J. H., Le H. P. New Look at Flux-Free Ultrasonic Soldering // Welding J. 2000. V. 79. № 9.