

Высокочастотная конструкционная и монтажная пайка

Высокочастотный электромагнитный нагрев, обладающий высокой скоростью бесконтактного и локального нагрева проводящих материалов в любой среде, применяют как для конструкционной, так и для монтажной пайки в электронике. Для формирования качественных паяных соединений необходим правильный выбор частоты нагрева, конструкции индуктора и оптимизация температурного профиля процесса.

Владимир Ланин

vlanin@bsuir.by

Физические принципы высокочастотного нагрева

Для формирования паяных соединений в настоящее время широко применяют бесконтактные методы нагрева в виде концентрированных потоков излучения электромагнитных полей в широком частотном диапазоне. Особое место в этом диапазоне занимают электромагнитные поля высокой частоты (ВЧ), воздействие энергии которых на паяемые детали и припой проявляется в виде высокопроизводительного бесконтактного нагрева до температуры пайки с помощью наведенных в металле вихревых токов. Скорость нагрева может быть увеличена до 10 раз по сравнению с конвективными источниками, зона нагрева локализуется в пределах участка, определяемого конструкцией индуктора. Высокая скорость нагрева токами ВЧ достигается соответствующим выбором частоты тока. Поскольку плотность токов ВЧ по сечению детали распределяется неравномерно, а увеличивается к поверхности вследствие поверхностного эффекта, то глубина их проникновения в металл определяется как:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (1)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление металла, μ — магнитная проницаемость металла, f — частота.

Нагрев электромагнитным полем средней частоты 66–150 кГц с интенсивностью 1–100 МВт/м², при котором отношение глубины проникновения к толщине детали h находится в пределах $\delta/h < 0,5$ –1,0, используется для конструкционной пайки волноводных трактов, металлобужажных конденсаторов, коммутационных элементов, твердосплавного инструмента и т. д. [1, 2].

Для каждого конкретного случая пайки время нагрева можно определить по специальным диаграммам, если известна мощность индуктирующего устройства, приходящаяся на данную массу. При расчете массы принимают во внимание лишь тот объем детали, который фактически должен нагреваться до температуры пайки. Время находится в пределах нескольких секунд и лишь в исключительных случаях превышает минуту.

Индукционная пайка электромагнитным полем среднечастотного диапазона имеет преимущественное применение при малых размерах деталей во всех видах производства. Для этого применяются индукционные установки с выходной мощностью от 10 до 25 кВт, которые состоят из генератора (1), рабочего стола, где размещается выносной блок конденсаторов, высокочастотный трансформатор (2) и индуктор (3) (рис. 1). При пайке простых по конфигурации деталей, таких как цилиндрические или прямоугольные стержни, нагреваемые в кольцевых индукторах, необходимую выходную мощность генератора определяют как [1]:

$$P_r = \frac{c \times M (T_{II} - T_0)}{0,24 \tau \times \eta}, \quad (2)$$

где c — удельная теплоемкость металла в интервале от исходной температуры до температуры пайки; M — масса нагреваемой детали; T_{II} — температура пайки, °С; T_0 — начальная температура, °С; τ — время нагрева, с; η — КПД индуктора, принимаемый равным 0,7–0,8 при нагреве стали и 0,3–0,4 при нагреве меди.

Активная удельная мощность ВЧ-нагрева, выделяемая в изделии, равна [3]:

$$P_H = 2,0 \times 10^{-4} \times I_1 \times W_1^2 \sqrt{\rho \mu} f \times F, \quad (3)$$

где I_1 — ток индуктора, W_1 — число витков индуктора, ρ и μ — удельное электросопротивление и магнитная проницаемость металла, F — функция, зависящая от геометрии индуктора, размеров детали и частоты тока.

Активную мощность, потребляемую индукционной установкой от сети P_c , можно выразить через полезную мощность $P_{пол}$:

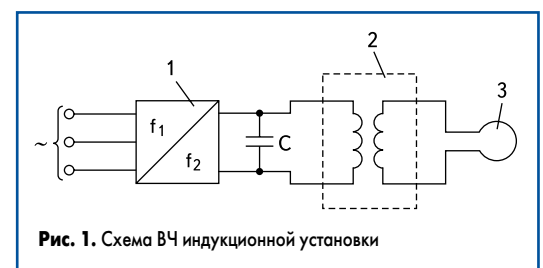


Рис. 1. Схема ВЧ индукционной установки

$$P_c = P_{пол} / \eta_u \times \eta_{кб} \times \eta_l \times \eta_{пу}, \quad (4)$$

где $\eta_u, \eta_{кб}, \eta_l, \eta_{пу}$ — КПД индуктора, конденсаторной батареи, линии и питающего устройства соответственно.

Полный КПД индуктора:

$$\eta_u = \eta_э \times \eta_m, \quad (5)$$

где η_m — термический КПД индуктора:

$$\eta_m = \frac{P_{пол}}{P_{пол} + \Delta P_T}, \quad (6)$$

где ΔP_T — тепловые потери в индукторе; $\eta_э$ — электрический:

$$\eta_э = \frac{P_{пол} + \Delta P_T}{P_U} = \frac{P_{пол} + \Delta P_T}{P_{пол} + \Delta P_T + \Delta P_э}, \quad (7)$$

где $\Delta P_э$ — электрические потери в индукторе.

Для круглых заготовок диаметром d_2 и диаметра индуктора d_1 :

$$\eta_э^{np} = \frac{1}{1 + \frac{d_1}{d_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \mu_2}}}. \quad (8)$$

Практически предельное значение электрического КПД достигается при значениях $d_2/\delta > 10$ для стали 0,7–0,8, для меди — 0,5.

При пайке металлических корпусов микроэлектронных устройств, содержащих размещенную внутри подложку или плату с элементами, чувствительными к электрической составляющей поля, энергия электромагнитной наводки должна быть много меньше энергии деградации элементов ИМС, которая составляет 10–15 мкДж [4]. На глубине, равной 4δ , напряженность поля будет ослаблена в 100 раз по сравнению с поверхностью и на порядок ниже напряженности наводок, приводящих к деградации внутренних элементов. Верхний предел частоты тока вытекает из требования максимальной величины термического КПД нагрева. Таким образом, выбор частоты при пайке микроэлектронных устройств в корпусном исполнении необходимо осуществлять из условия [5]:

$$h/8 < \delta \leq h/4, \quad (9)$$

где δ — глубина проникновения ТВЧ в металл, h — толщина корпуса.

Частотный диапазон ВЧ-нагрева с учетом соотношения (9) определяется так:

$$f_{max} - f_{min} = \frac{(4-16) \times 10^{-6} \times \rho}{\mu \times h^2}. \quad (10)$$

Этим условиям соответствует нагрев энергией ВЧ электромагнитных колебаний в диапазоне 440–2000 кГц. С повышением частоты нагрева происходит локализация тепловыделения, снижается температурное воздействие на паяемое изделие. Дальнейшее повышение локальности и избирательности нагрева токами ВЧ достигают с помощью магнитопроводов из феррита, устанавливаемых вблизи на-



Рис. 2. Применение ВЧ-нагрева для конструкционной пайки

греваемых мест. Воздействие мощного электромагнитного поля на расплавленный припой вызывает его интенсивное перемешивание за счет вихревых токов и пондеромоторных сил, что улучшает растекание припоя.

Воздействие энергии электромагнитных колебаний позволяет осуществить не только высокопроизводительный бесконтактный нагрев деталей и припоя с помощью наведенных в них вихревых токов ВЧ, но и активировать припой и улучшить его растекание по паяемым поверхностям. Качество паяемых соединений в процессах ВЧ-пайки зависит от скорости нагрева деталей и припоя, избирательности и локальности нагрева, равномерности и регулируемости нагрева во времени и по сечению паяемых деталей.

Скорость нагрева токами ВЧ пропорциональна мощности, выделяемой в детали:

$$P = \frac{V_{эф}^2 \times \eta \times \cos \phi}{R_H}, \quad (11)$$

где $V_{эф}$ — эффективное напряжение на индукторе, $\cos \phi$ — коэффициент мощности нагрева, R_H — электрическое сопротивление зоны нагрева.

Электрическое сопротивление зоны нагрева определяется как:

$$R_H = \frac{2\pi \times l_H \sqrt{\rho \mu} f}{H}, \quad (12)$$

где l_H — периметр зоны нагрева, H — ширина зоны нагрева.

Таким образом, ВЧ-нагрев характеризуется наибольшей эффективностью для металлов, имеющих большие удельное сопротивление и магнитную проницаемость (например, никелевые сплавы), которая уменьшается обратно пропорционально корню квадрата частоты колебаний. Снижение частоты колебаний увеличивает электродинамический эффект перемешивания расплавленного припоя.

Технология и оборудование ВЧ конструкционной пайки

ВЧ конструкционная пайка широко применяется в инструментальном производстве, крупносерийном производстве конденсаторов, релейной аппаратуры, трубчатых электрона-

гревателей, коммутационных устройств и волноводных трактов. Коммутационные устройства: контакторы, автоматические выключатели и т. д., как низковольтные, так и высоковольтные, содержат контакты из металлов и сплавов с особыми свойствами на базе серебра, меди, никеля, вольфрама и других элементов. Контакты изготавливают в виде пластин, которые крепят, как правило, с помощью пайки к медному контактодержателю, таким образом, они образуют с ним контактный узел.

Пайка контактных узлов производится в основном твердыми серебросодержащими припоями с применением ВЧ-нагрева. Большая номенклатура и сложность конфигурации контактодержателей затрудняет проектирование нагревательных систем, выбор частоты и мощности источников питания и разработку индукторов. Исходя из требований унификации (на одном посту необходимо паять детали толщиной приблизительно от 0,5 до 5 мм) выбирают генераторы с рабочей частотой 66 или 440 кГц. Области применения ВЧ конструкционной и монтажной пайки приведены на рис. 2.

Пайка производится на круглом металлическом столе, где неподвижно смонтированы приспособления для крепления хвостовых частей контактодержателей. Столу сообщается дискретное вращение, то есть быстрый поворот на один шаг — угол между соседними приспособлениями — и выдержка в каждом положении. Производительность станка — до 900 паяк в час. Операции загрузки порошкообразной смеси припоя с флюсом, а также контактных пластин механизированы. В зону нагрева, охватывающую три-шесть позиций, паяемые узлы поступают в собранном состоянии.

Для конструкции станка применяют два проходных индуктора. Нагрев узлов, у которых зона пайки контактодержателя не экранируется другими частками, производится в индукторах с односторонним расположением индуктирующих токопроводов. В них нагревались контактодержатели нескольких типоразмеров различной конфигурации. На частоте 66 кГц достигался равномерный нагрев поверхностей, подлежащих пайке до 700...800 °С за 10–16 с, независимо от толщины контактодержателя [6].

Для предотвращения чрезмерного нагрева металлического стола применен водоохлаждаемый медный экран. Конфигурации некоторых

контактодержателей, подлежащих пайке, не удастся нагреть в индукторах с односторонним расположением индуктирующих токопроводов. Для нагрева таких узлов разработаны проходные индукторы с двусторонним расположением индуктирующих токопроводов (рис. 3). В них зона пайки нагревается в основном за счет теплопроводности, в связи с чем возникает опасность перегрева участка контактодержателя вплоть до расплавления. Поэтому приходится увеличивать время нагрева, но при этом снижается производительность, либо увеличивать длину индуктора, чтобы нагревать в нем одновременно больше деталей. Это ведет к росту потребляемой мощности из-за повышенных энергетических потерь и эксплуатации генератора в неоптимальном режиме.

Стабильное качество паяных узлов достигнуто при дозировании энергии по времени нагрева при стабилизированных режимах работы генератора. Однако при пайке некоторых типоразмеров контактных узлов возникает брак от 10 до 50%, в основном, из-за непропаев или вытекания припоя, что является следствием непостоянства температуры заготовок.

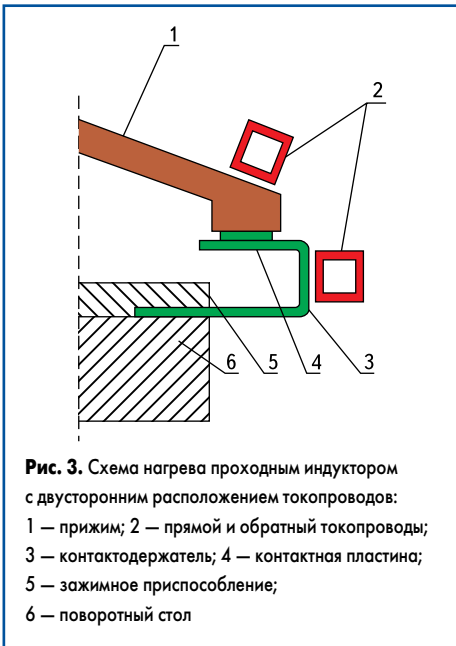


Рис. 3. Схема нагрева проходным индуктором с двусторонним расположением токопроводов:
1 — прижим; 2 — прямой и обратный токопроводы;
3 — контактодержатель; 4 — контактная пластина;
5 — зажимное приспособление;
6 — поворотный стол

При дозировании энергии по времени причинами разброса температуры нагрева могут быть: недостаточная стабилизация режимов лампового генератора (генераторы типа ВЧИ-100/0,066 имеют стабилизацию анодного напряжения 1% при колебаниях в сети до 10%, однако напряжение питающей сети может отличаться от номинального на 15–20%, и этот фактор трудно устранить); нестабильное положение паяемых деталей относительно индуктора, определяемое разбросом формы и размеров (массой деталей, точностью механизмов и зажимных приспособлений, величиной люфтов; при этом разброс температуры может быть уменьшен путем увеличения времени нагрева); непостоянство физических свойств (электропроводности, теплоемкости и др.) паяемых деталей — очень существенный фактор.

Для того чтобы при механизированной индукционной пайке деталей круглой формы — сферических втулок, колец и др. — не пользо-

ваться для каждого размера отдельным индуктором, разработан газоохлаждаемый индуктор с взаимозаменяющимися частями [7]. Такой индуктор для ВЧ-пайки в газовой среде, в сравнении с обычным кольцевидным индуктором, более универсален, так как все составные части изготовлены, собраны и спаяны из меди. К этому добавляется еще и необходимое охлаждение водой и защитный газ.

Конструкция базового индуктора предусмотрена с разными вставками для различных труб. Сборка проводится при помощи латунных шурупов (рис. 4). Внутренний диаметр базисного индуктора (4) соответствует самым большим трубам (1). При этом измеренные значения вставок (5, 6) и паяемых деталей должны сочетаться. Щель между индукторной вставкой и паяемыми деталями соответствует 2,5 мм. Чтобы достигнуть наиболее равного заполнения паяемой поверхности защитным газом, устанавливается подача газа (8). Для изменения направления защитного газа в верхних вставках устанавливается выступ (7). Расход защитного газа составляет от 200 до 300 л/ч. В качестве защитного газа применяется редуцированный газ, H_2/N_2 — смешанный, или формир-газ с отношением в смеси 1:5.

Включение ВЧ-энергии происходит одновременно с подачей защитного газа. Чтобы противодействовать образованию воды из водорода защитного газа от основы карбоната меди под действием влажности при конденсации, необходимо работать с дросселируемым охлаждением, так, чтобы индикатор показывал температуру 25...35 °С.

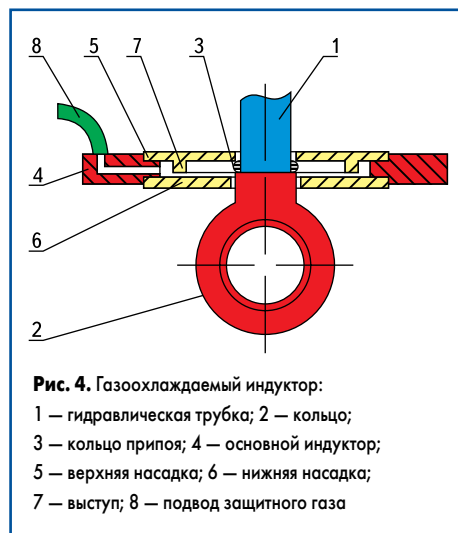


Рис. 4. Газоохлаждаемый индуктор:
1 — гидравлическая трубка; 2 — кольцо;
3 — кольцо припоя; 4 — основной индуктор;
5 — верхняя насадка; 6 — нижняя насадка;
7 — выступ; 8 — подвод защитного газа

Для паяльных работ применялся генератор типа GI 15/06 T-035 с бесступенчатой регуляторной мощности от 0 до 15 кВт через тиристорный регулятор переменного тока частотой от 420 до 660 кГц. Рабочий стол служит для крепления зажимного устройства заготовок. При глубине вставки трубки в соответствующий соединительный патрубок от 6 до 8 мм применялся припой с диаметром проволоки от 1 мм при паяльной щели 0,1 мм. Количество защитного газа регулировалось при пайке так, чтобы образующееся слабое газовое пламя выше и ниже индуктора закрывало заготовку на несколько миллиметров. Время пайки составляло 15–25 с для различных диаметров тру-

бок при использовании мощности генератора на 35%. После пайки защитным газом на заготовках остается только легкий слой оксида и окалины, который без труда удаляется.

При ВЧ-нагреве нескольких заготовок, находящихся на большом расстоянии друг от друга в индукторе, имеющем форму канала, возникает неравномерность нагрева участков заготовок, удаленных от индуктора. Для обеспечения равномерности нагрева заготовки необходимо вращать, что не всегда осуществимо. Для устранения неравномерности нагрева предложено заполнить рабочее пространство индуктора немагнитными вставками с низким электрическим сопротивлением, например из меди (рис. 5). Токи, наводящиеся во вставках, имеют обратное направление, чем в индукторе, и вызывают соответствующие токи в заготовках, что повышает эффективность индуктора.

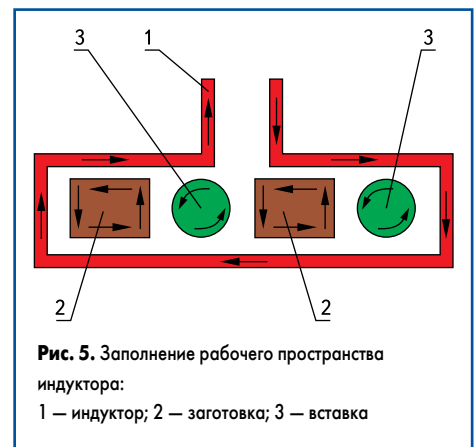


Рис. 5. Заполнение рабочего пространства индуктора:
1 — индуктор; 2 — заготовка; 3 — вставка

ВЧ-нагрев успешно применяют для пайки магнитострикционных преобразователей тугоплавкими серебросодержащими припоями. Для этого используют ВЧ-генератор мощностью 25 кВт, работающий на частоте 66 кГц. При ВЧ-нагреве одновитковым индуктором пластинчатый припой расплавляется, и для формирования равномерного соединения к преобразователю прикладывают определенное внешнее усилие (рис. 6).



Рис. 6. ВЧ-пайка магнитострикционного преобразователя

Монтажная ВЧ-пайка

Ручная пайка штыревых контактов разъемов к печатным платам всегда отличалась большой трудоемкостью, недостаточной повторяемостью соединений и большой вероятностью повреждения печатных проводников нагретым паяльником. Индукционный

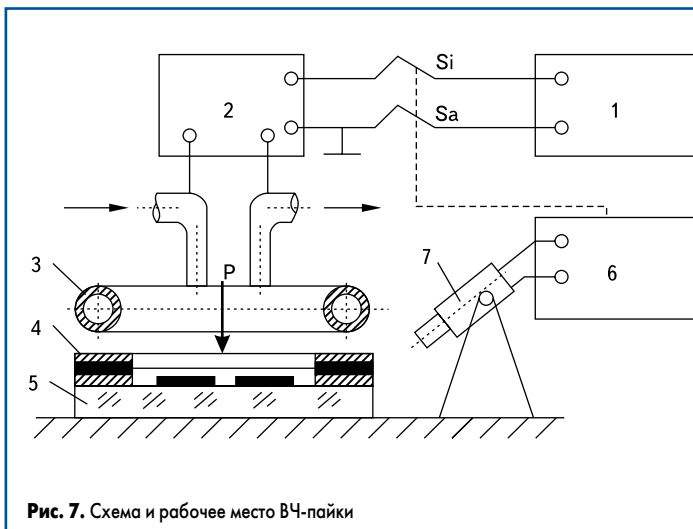


Рис. 7. Схема и рабочее место ВЧ-пайки

нагрев контактов из магнитного материала — никеля — позволил реализовать групповую пайку с высокой производительностью. При размещении 24 контактов в электромагнитном поле индукционного витка, питаемого от генератора с частотой 450 кГц и мощностью 5 кВт, каждый контакт испытывает индивидуальный нагрев, вызывающий расплавление припоя на контактных площадках печатной платы. Это позволяет получать хорошее качество соединений с контролируемой дозой припоя. Этот метод также удобен и для распайки разъемов и удаления их с платы.

Для повышения качества контактных соединений при ВЧ-пайке многовыводных разъемов в металлизированные отверстия МПП поверхность платы, обращенную к индуктору, охлаждают химически нейтральной жидкостью, например спиртоглицериновой смесью. Жидкость, обволакивая участки пайки, защищает припой от окисления и снижает нагрев платы. При нагреве от генератора ВЧИ-10 в режиме: $I_a = 1,5-2$ А, $I_c = 0,25-0,35$ А время пайки — не более 15–20 с, а нагрев платы не превышал 60...70 °С.

Повышение качества паяных соединений и улучшение смачивания паяемых поверхностей достигают модуляцией ВЧ-колебаний

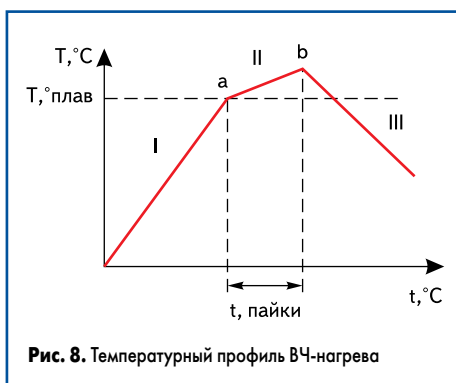


Рис. 8. Температурный профиль ВЧ-нагрева

в диапазоне 100–1000 кГц низкочастотным сигналом 18–66 кГц от внешнего источника с глубиной модуляции 20–100% [8] (рис. 7). Схема содержит источник НЧ-колебаний (1), ВЧ-генератор (2), индуктор (3), паяемые детали (рамку 4 и подложку 5 с толстопленочной металлизацией), устройство управления (6) и пирометр (7). Бесконтактный ввод УЗ-колебаний при ВЧ-нагреве способствует формированию качественных паяных соединений за счет полного заполнения швов в соединениях.

При ВЧ-нагреве важно оперативно регулировать скорость нагрева так, чтобы паяемые детали и припой одновременно достигали

температуры пайки [9]. На индуктор подают ВЧ-напряжение и нагревают изделие (участок I на рис. 8). После расплавления припоя (точка a) снижают интенсивность ВЧ-нагрева в зависимости от требуемого температурного режима процесса пайки (участок II), что позволяет избежать перегрева припоя, а также снизить нагрев изделия. Затем ВЧ-напряжение отключают и изделие охлаждают (точка b, участок III).

Для пайки рамки (1) к плате микросборки (2) разработано устройство (рис. 9), содержащее прижим (3), индуктор (5), кассету (4) и теплоизолирующую плату (6). Расположение индуктора под платой исключает случайное прикосновение к нему в процессе пайки, перемещение кассеты может быть автоматизировано с помощью транспортного устройства. Нижнее расположение индуктора отличается более пологой характеристикой нагрева, что исключает перегрев БИС, а также прикосновение к индуктору, что повышает безопасность в работе.

Индукционный нагрев успешно применен для присоединения оплавлением шариков бесвинцового припоя диаметром 0,76 мм к контактным площадкам платы, имеющим покрытие никелем 10 мкм и золотом 0,05 мкм. Шарики вручную размещались на подложке, а затем вместе с подложкой нагревались в центре витка индуктора (рис. 10). Частота тока составляла 300 кГц, величина тока варьировалась от 11 до 29 А. Температура оплавления припоя достигалась при токе индуктора 17 А за 12 с и токе 27 А

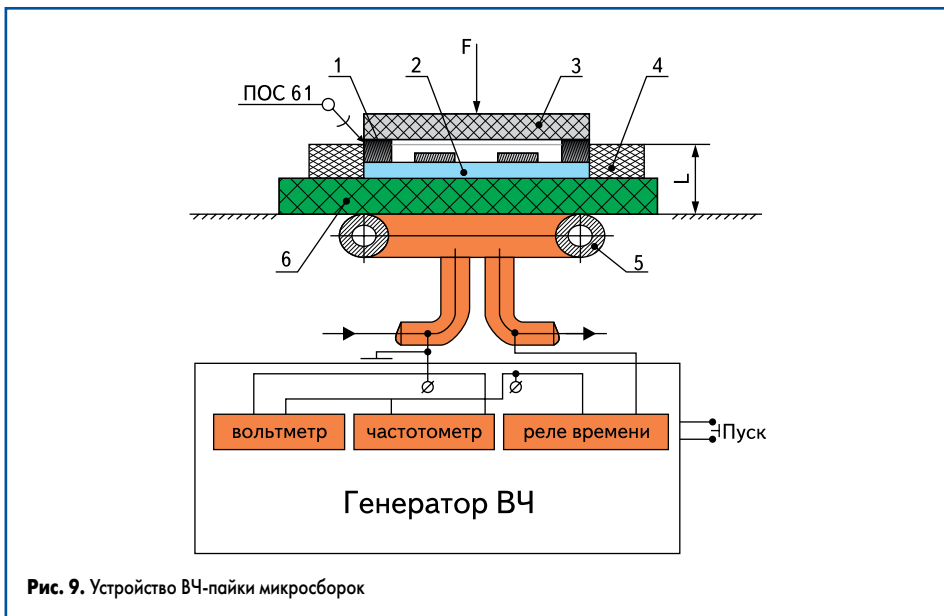


Рис. 9. Устройство ВЧ-пайки микросборок

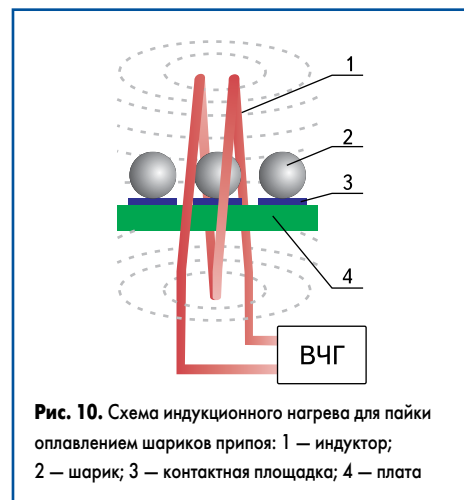


Рис. 10. Схема индукционного нагрева для пайки оплавлением шариков припоя: 1 — индуктор; 2 — шарик; 3 — контактная площадка; 4 — плата

за 3 с [9]. Затем шарики припоя были использованы для присоединения БИС в корпусе BGA к контактными площадкам платы.

Используя физические закономерности активации энергией ЭМ-поля, можно обеспечить высокопроизводительный бесконтактный нагрев ИЭ с помощью вихревых токов, активировать расплавленный припой и улучшить его смачивание и растекание по паяемым поверхностям и тем самым повысить качество контактных соединений. ■

Литература

1. Вологдин В. В., Куц Э. В., Асамов В. В. Индукционная пайка. Л.: Машиностроение, 1989.
2. Induction Heating. Industrial Applications / Ed. by S. Lupi. Paris: U. I. E., 1992.
3. Простяков А. А. Индукционные нагревательные установки. М.: Энергия, 1970.
4. Рикетс Л. У., Бриджес Д. Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты. М.: Атомиздат, 1979.
5. Ланин В. Л., Тявловский М. Д. Особенности высокочастотного нагрева при герметизации пайкой корпусов БИС // Электронная техника. Серия 7. 1980. № 3.
6. Базырин П. Е., Вологдин В. В., Куц Э. В. и др. Опыт высокочастотной пайки контактных узлов электроаппаратов // Труды ВНИИТВЧ. 1975. Вып. 15.
7. Peter H. J. Wirtschaftliches HF Induktionsloten von Hydraulikrohren mit Schutzgasklappinduktoren // Schweibtechnik. 1983. № 4.
8. Ланин В. Л., Достанко А. П., Телеш Е. В. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники. Минск: Издательский центр БГУ, 2007.
9. Ланин В. Л. Высокочастотный электромагнитный нагрев для пайки электронных устройств // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 5.
10. M. Li, H. Xu, S-W. R. Lee, J. Kim, D. Kim. Eddy current induced heating for the soldering reflow of area array packages // IEEE Trans. on Advanced Packaging. 2008. № 2 (31).