

В.Л. Ланин

## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ НАГРЕВ В ПРОЦЕССАХ ПАЙКИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул.П.Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь*

Воздействие энергии высокочастотных (ВЧ) электромагнитных колебаний позволяет осуществлять высокопроизводительный бесконтактный нагрев при пайке деталей и припоя с помощью наведенных в них вихревых токов, а также активировать припой и улучшить его растекание по паяемым поверхностям. Качество паяных соединений зависит от следующих факторов ВЧ нагрева: времени, скорости, площади зоны нагрева, плотности мощности и др. [1]. Эффективность нагрева определяется электрофизическими свойствами материалов деталей, частотой тока и конструктивными параметрами индукционных устройств. Вследствие поверхностного эффекта тепловая энергия локализуется в тонком слое, толщина которого определяется глубиной проникновения токов ВЧ. Пайка электронных устройств характеризуется невысокой удельной мощностью нагрева, малыми габаритами паяемых деталей, чувствительностью электронных устройств к электромагнитным наводкам. Поэтому для оптимизации параметров ВЧ нагрева в процессах пайки электронных устройств необходимы аналитические зависимости для вычисления эффективной мощности, выделяемой в зоне нагрева и коэффициента полезного действия (КПД) нагрева.

Эффективная мощность ВЧ нагрева в общем случае определяется согласно следующего выражения [2]

$$P_{эф} = \frac{U_{эф}^2 \cos \varphi \eta}{R_n}, \quad (1)$$

где  $U_{эф}$  – эффективное напряжение на индукторе,  $\cos \varphi$  - коэффициент мощности,  $\eta$  - КПД ВЧ нагрева,  $R_n$  – электрическое сопротивление токам ВЧ в зоне нагрева.

Для оптимизации пайки соединений различного типа необходимо получить выражения для  $\cos \varphi$  и  $\eta$ . Коэффициент мощности ВЧ нагрева зависит от величины зазора  $h$  между поверхностью детали и индуктором, а также от глубины проникновения  $\delta$  токов ВЧ и магнитной проницаемости  $\mu$  материала

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + (1 + \sqrt{2} \frac{h}{\delta \cdot \mu})^2}}. \quad (2)$$

Учитывая, что

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu \cdot f}}, \quad (3)$$

где  $\rho$  - удельное электрическое сопротивление материала,  $f$  - частота тока, а  $\mu_0$  - магнитная постоянная, получим

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + (1 + \sqrt{2\mu_0 h} \sqrt{\frac{f}{\rho \cdot \mu}})^2}}. \quad (4)$$

В процессах пайки соединений телескопического типа используют схему ВЧ нагрева с индуктором кольцевого типа (рис.1). При увеличении зазора  $h$  от 1 до 10 мм на частотах от 400 до 2000 кГц коэффициент мощности для диамагнетиков падает почти в 10 раз, а для ферромагнетиков - в 3 – 4 раза (рис. 2). Поэтому для нагрева диамагнитных материалов необходимо уменьшить величину зазора для значений, обеспечивающих нормальную работу индуктора.

КПД ВЧ нагрева определяется соотношением электрических сопротивлений индуктора  $R_u$  и материала детали в зоне нагрева  $R_d$  [3]

$$\eta = \frac{R_d}{R_d + R_u} = \frac{1}{1 + R_u / R_d}. \quad (5)$$

В индукционных устройствах ВЧ нагрева деталей небольших размеров необходимо в формуле (5) учитывать также активное сопротивление токоподвода  $R_{ти}$ , соединяющего индуктор с генератором и которое по величине сравнимо с  $R_u$ .

При определении  $R_u$  допускаем, что ток ВЧ в индукторе протекает в основном в слое глубиной  $\delta_u$ , а длина индуктора зависит от его диаметра витка  $D_u$  и числа витков  $N$

$$R_u = \frac{ND_u \sqrt{\rho_u \mu_0 \cdot f}}{d_u}, \quad (6)$$

где  $d_u$  – диаметр трубки индуктора.

Подставив значения констант  $\rho_u$ ,  $\mu_0$  и приняв размерность частоты в МГц, получим

$$R_u = 0,15ND_u \frac{\sqrt{f}}{d_u}, \text{ мОм} \quad (7)$$

При тех же допущениях сопротивление токоподвода

$$R_{TH} = 2\rho_u \frac{L_{TH}}{\pi \cdot d_u \delta_u}. \quad (8)$$

С учетом выражения (3), получим

$$R_{TH} = 2L_{TH} \frac{\sqrt{\rho_u \mu_0 f}}{\pi \cdot d_u}. \quad (9)$$

Подставив значения констант

$$R_{TH} = 0,1L_{TH} \frac{\sqrt{f}}{d_u}, \text{ мОм}. \quad (10)$$

Тогда КПД нагрева определяется выражением

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_u + R_{TH}}{R_\delta}} = \frac{1}{1 + \frac{(0,15ND_u + 0,1L_{TH}) \cdot \sqrt{f}}{R_\delta \cdot d_u}}. \quad (11)$$

Электрическое сопротивление токам ВЧ в зоне нагрева можно определить из предположения, что ширина зоны нагрева при малых величинах зазора  $h$  определяется проекцией диаметра индуктора, а длина зоны – кольцом длиной  $\pi \cdot ND_d$  (рис. 1)

$$R_\delta = \frac{\rho_\delta N \pi D_\delta}{d_u \delta}. \quad (12)$$

С учетом выражения (3) получим

$$R_\delta = \frac{\pi ND_\delta}{d_{II}} \sqrt{\frac{\rho_\delta}{\mu_0 \rho f}}. \quad (13)$$

Электрическое сопротивление в зоне ВЧ нагрева линейно снижается с уменьшением числа витков индуктора, диаметра детали. Максимальные значения КПД на уровне 0,9-0,95 достигаются для магнитных материалов при  $D_d \leq 0,01$  м (рис. 3).

Подставим выражения (4), (11), (13) в (1) и ,делав преобразования, получим итоговое выражение для эффективной мощности ВЧ нагрева

$$P_{эф} = \frac{U_{эф}^2}{\left( \sqrt{1 + \left(1 + \sqrt{2\mu_0} h \sqrt{\frac{f}{\rho_0 \mu}}\right)^2} \right) \left(1 + \frac{(0,15ND_u + 0,1L_{III})f}{\pi ND_0} \sqrt{\frac{\rho \mu \mu_0}{\rho_0}}\right)}. \quad (14)$$

Эффективное напряжение на индукторе зависит от типа ВЧ генератора и составляет 50 - 500 В, при этом мощность нагрева изменяется от 1 до 100 кВт в зависимости от магнитных и электрических свойств материалов (рис. 4). Магнитные материалы при прочих равных условиях требуют меньшей удельной мощности. Общей закономерностью для всех магнитных материалов является нелинейное снижение мощности нагрева в зависимости от частоты токов ВЧ, что связано с проявлением поверхностного эффекта. Однако снижение частоты тока увеличивает электродинамический эффект перемешивания расплавленного припоя и повышает тем самым его растекаемость.

При пайке корпусных электронных устройств, чувствительных к электрической составляющей поля, выбор частоты необходимо осуществлять из условия [4]

$$\delta < H/4, \quad (15)$$

где H- толщина стенки корпуса.

В этом случае напряженность поля внутри корпуса будет ослаблена в 100 раз по сравнению с поверхностью, что исключит деградацию электронных компонентов. Нижняя граница частотного диапазона с учетом соотношения (15) определится как

$$f_{\min} > 4 \cdot 10^6 \rho / \mu H^2. \quad (16)$$

Верхняя граница частотного диапазона выбирается исходя из максимального КПД нагрева.

Исследования проведены для 2-х типов индукционных устройств: кругового (рис.5) и на незамкнутом магнитопроводе (рис. 6). Первое устройство содержало круговой индуктор с цилиндрическим магнитным сердечником, ВЧ генератор, пирометр. Во втором устройстве генератор 1 подключался к обмотке индуктора с магнитопроводом 2 из ферромагнитного материала. В зазоре магнитопровода нагревались детали 4. Обмотка подмагничивания постоянным током подключена к входу регулирующего выпрямителя 3. Температура в рабочей зоне измерялась термопарой и регистрировалась прибором 6. Напряженность ЭМ поля в зазоре воспринималась рамкой и оценивалась прибором 7. Параметры ЭМ поля контролировались на выходе генератора с помощью стандартных приборов. Величина тока подмагничивания варьировалась переменным резистором R.

Зависимости напряженности ЭМ поля от анодного напряжения носят нелинейный характер (рис.7). Для второго типа индуктора напряженность поля в 4,5 раза выше ввиду концентрации магнитного поля.

Термические зависимости для пайки корпусов интегральных схем (рис.8) показали влияние конструкции индуктора кругового типа. 2-х витковый индуктор с витками в одной плоскости (2) имеет более пологий участок кривой нагрева, чем у одновиткового индуктора (3). Это создает более равномерный нагрев деталей, соединяемых пайкой, способствует более полному заполнению припоем зазора между соединяемыми деталями при сравнительно небольшом времени пайки – не свыше 10 с. Применение магнитопровода из феррита (1) повышает эффективность нагрева в 1,6 – 1,7 раза, сокращая тем самым время пайки.

Анализ зависимостей температуры в рабочей зоне устройства на незамкнутом магнитопроводе от времени нагрева и коэффициента перекрытия зазора  $K_{\text{п}}$ , показал, что на первом этапе нагрева (до 10 с) скорость нагрева составляла 60 °С/с, в дальнейшем скорость уменьшилась до 20 °С/с, что объясняется увеличением потерь энергии в окружающую среду за счет излучения. При  $K_{\text{п}} > 1$  рассеяние тепла происходит с большей скоростью. Материалы с низкой электропроводностью при оптимальном перекрытии зазора испытывают нагрев со скоростью до 30<sup>0</sup> С/с. Напряженность электромагнитного поля в зазоре на низких частотах 20 – 60 кГц составляла  $(2.0 – 2.5) * 10^4$  А/м.

Для повышения качества паяных соединений за счет увеличения площади растекания припоя и более полного заполнения им капиллярных зазоров в соединении с момента начала растекания припоя до окончания пайки паяемому изделию сообщали низкочастотные вибрации путем подачи переменного тока подмагничивания частотой 50-400 Гц и амплитудой 1-10 А в индуктирующую обмотку. Амплитуда вибраций деталей составляла 0,5 – 1,0 мм.

ВЧ нагрев в диапазоне частот 1200 – 1500 кГц характеризуется большей зависимостью от величины мощности и электрофизических характеристик материалов. При мощности нагрева 1 кВт напряженность поля составляет  $4.5 * 10^4$  А/м, а время пайки магнитных материалов – 5 с (рис.9).

Оптимизация параметров ВЧ нагрева энергии позволила обеспечить высокую скорость нагрева в локальных зонах формирования паяных соединений и улучшить их качество за счет совместного действия поверхностного эффекта и пондеромоторных сил. Предпочтительным является индуктор на магнитопроводе, так как у него более высокий КПД за счет снижения излучения в окружающее пространство.

## Литература

1. *Thwaites C.J.* Soldering technology - a decade of developments // *Int. Metals. Rev.* 1984. V.29. № 2. P.45-74.

2. *Benkowsky G.* Grundlagen der Induktionserwärmung// Elektro-Praktiker. 1974.Bd 28. № 8. S. 265-268.
3. *Вологдин В.В., Куц Э.В., Асамов В.В.* Индукционная пайка. - Л.: Машиностроение, 1989.
4. *Ланин В.Л., Хмыль А.А.* Современные процессы пайки в производстве РЭА. – Мн.: БелНИИНТИ, 1988.
5. *Ланин В.Л., Тявловский М.Д.* Особенности высокочастотного нагрева при герметизации пайкой корпусов БИС // Электронная техника. Сер. 7. 1980. № 3(100). С.11-14.
6. *Ланин В.Л., Черник А.А.* Герметизация интегральных схем электромагнитным нагревом // Известия Белорусской инженерной академии. 2000. № 1(9)/2. С. 132-133.
7. *Ланин В.Л.* Эффективность нагрева концентрированными потоками энергии при пайке в электронике // Электронная обработка материалов.2002. №2. С.17- 20.
8. *Ланин В.Л.* Моделирование высокочастотного электромагнитного нагрева в процессах пайки электронных устройств // Известия Белорусской инженерной академии. 2002. № 2(14)/2. С. 167-169.

Поступила

2003

УДК 621.365 (075.6)

Высокочастотный электромагнитный нагрев в процессах пайки электронных устройств.  
Ланин В. Л.// Электронная обработка материалов. 2004. № ( ) . С.

Исследованы и оптимизированы параметры высокочастотного нагрева для индукционных устройств кругового типа и на незамкнутом магнитопроводе. Определен частотный диапазон для пайки корпусных электронных устройств. Библиогр. 8. Ил. 9.

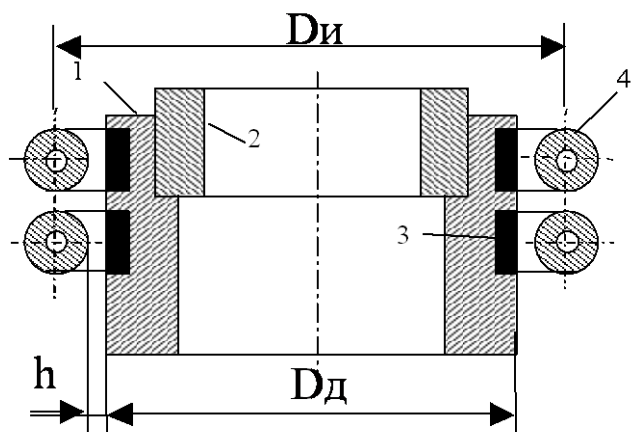


Рис. 1. Схема нагрева при ВЧ пайке:  
1, 2 - детали, 3-зона нагрева, 4 – индуктор

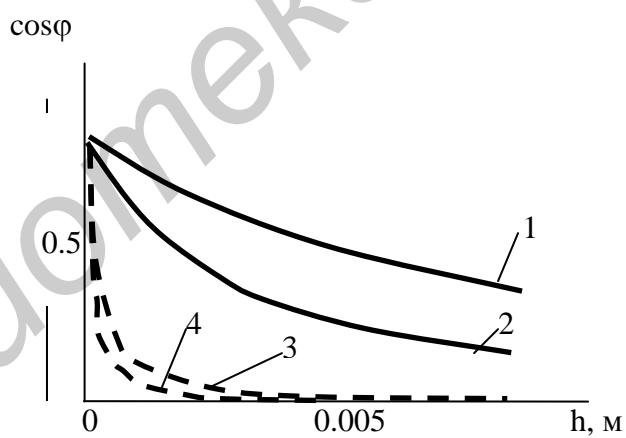


Рис. 2. Зависимости коэффициента мощности от величины зазора  $h$  и магнитных свойств материалов: 1- ковар, 2- сталь, 3- олово, 4- алюминий

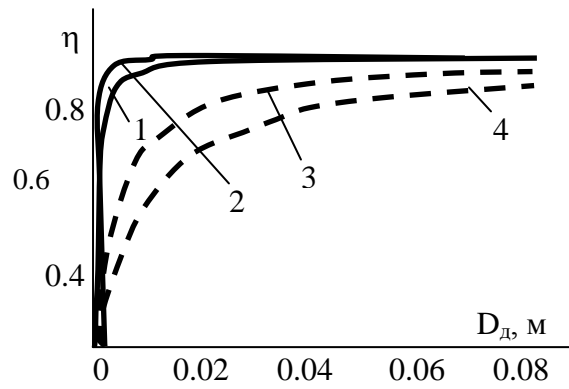


Рис. 3. Зависимости КПД ВЧ нагрева от диаметра детали и свойств материалов: 1 – ковар, 2 – сталь, 3 – олово, 4 – алюминий

1 –

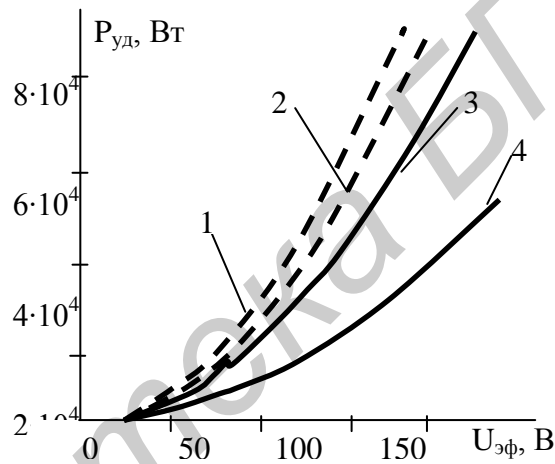


Рис. 4. Зависимости мощности ВЧ нагрева от напряжения на индукторе и свойств материалов: 1 – олово, 2 – алюминий, 3 – сталь, 4 – ковар

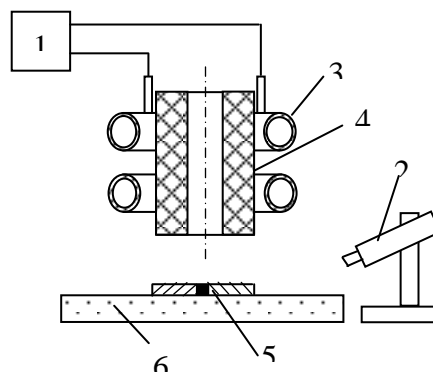


Рис.5. Схема нагрева круговым индуктором: 1– генератор, 2 –пирометр, 3 – индуктор, 4 – магнитный сердечник, 5 – детали, 6 – термоизолятор



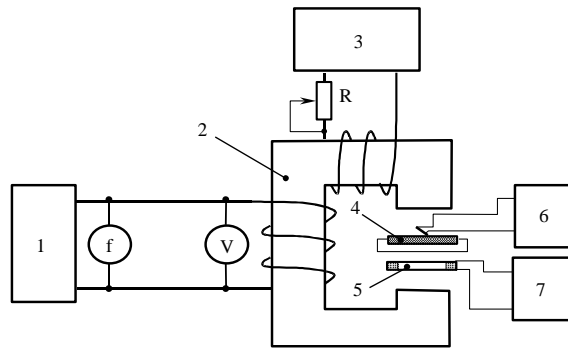


Рис. 6. Схема ВЧ нагрева в зазоре магнитопровода

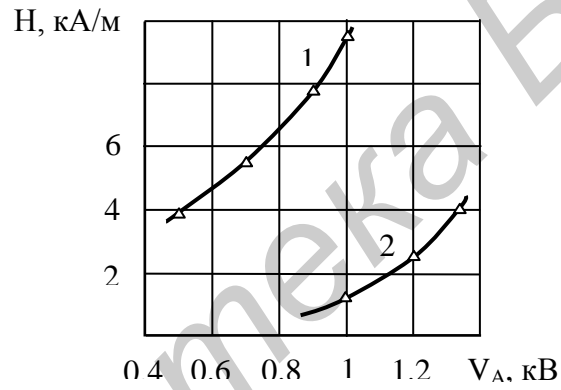


Рис.7. Зависимости напряженности ЭМ поля от анодного напряжения

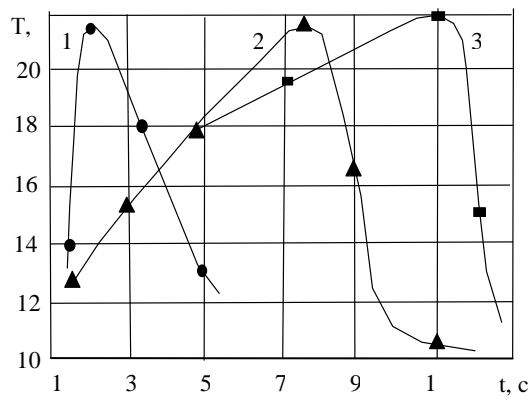


Рис. 8. Термические зависимости в зоне пайки ИМС

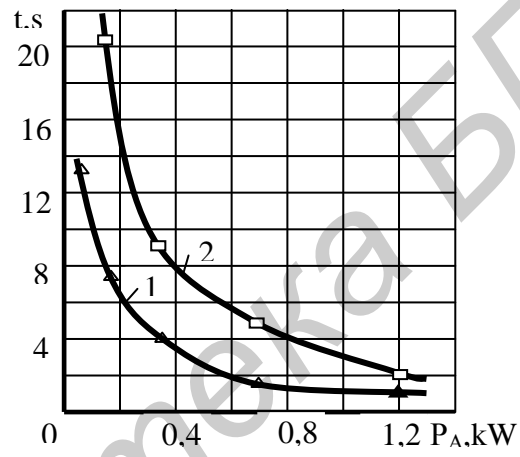


Рис. 9. Зависимости времени пайки от мощности ВЧ нагрева