

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАГРЕВА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ ПРИ ПАЙКЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

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

Современные процессы пайки в электронике активируют концентрированными потоками электромагнитной (ЭМ) энергии: высокочастотной (ВЧ), инфракрасной (ИК), лазерной, обеспечивающими локальное и бесконтактное воздействие источника нагрева на паянные детали, высокую производительность и возможность автоматизации процессов [1]. Воздействие энергии ВЧ ЭМ колебаний частотой 200–2000 кГц интенсивностью до  $10^7$  Вт/м<sup>2</sup> на процессы формирования паяных соединений увеличивает в 10 раз скорость нагрева, локализует до 5–10 мм<sup>2</sup> область пайки, улучшает растекание припоя за счет пондеромоторных сил. Недостатками являются проблема защиты персонала от мощного ЭМ излучения, зависимость скорости нагрева от электрофизических свойств металлических деталей [2].

Коротковолновое ИК излучение с длинами волн 1,0–2,5 мкм и интенсивностью до  $10^8$  Вт/м<sup>2</sup> позволяет быстро нагревать разнородные по химическому составу материалы, повысить локальность нагрева за счет фокусировки излучения, что обеспечивает групповую пайку поверхностно-монтируемых элементов (SMD), интегральных микросхем с планарными выводами при дозированном нанесении припоя или пасты на места будущих соединений [3]. Лазерное излучение в оптическом диапазоне волн 0,7–10,6 мкм обладает наибольшей концентрацией энергии излучения (до  $10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>), высокой локальностью и практической безынерционностью лазерного луча, что способствует его высокой управляемости с помощью микропроцессорных средств [4].

К 2004 г. ведущие европейские фирмы-изготовители электронной аппаратуры планируют отказаться от свинцово – содержащих припоев и перейти на альтернативные SnAgCu-припой с более высокой температурой плавления [5]. Зарубежные фирмы все более широко используют технологию “чистой” пайки "Clean Soldering" по экологическим соображениям. В свете современных требований рациональный выбор и применение концентрированных потоков электромагнитной энергии позволит решить проблемы скоростного и локального нагрева, активации припоя при пайке в электронике.

Цель работы – исследование энергетических и геометрических параметров воздействия электромагнитной энергии в виде полей и лучистых потоков на зону формирования паянного электрических соединений электронных компонентов. В качестве образца паяемого изделия использована многослойная печатная плата, в металлизированные отверстия которой закреплялись микротер-мопары типа ХК, подключенные к самописцу КСП-4.

Источниками концентрированных потоков энергии являлись ИК-лампы мощностью 500 и 1000 Вт; ВЧ-индукторы, питаемые от ВЧ-генератора мощностью 1000 Вт, оптический квантовый генератор (ОКГ) с длиной волны 1,06 мкм. Для оценки удельной мощности нагрева в зоне пайки различными источниками тепловой энергии применен датчик в виде медного диска площадью 1 см<sup>2</sup> массой 2,6 г с зачеканенной в глухом отверстии термопарой ХК. Удельная мощность оценивалась как

$$P_{уд} = \frac{cm}{S} \left( \frac{\Delta T}{\Delta t} \right), \quad (1)$$

где  $C$  – удельная теплоемкость меди;  $m$  – масса диска;  $S$  – его площадь;  $\Delta T/\Delta t$  – скорость роста температуры. С учетом данных диска формула (1) преобразована к виду

$$P_{уд} = 10^4 \left( \frac{\Delta T}{\Delta t} \right), \text{ Вт/м}^2 \quad (2)$$

Локальность нагрева определялась как

$$K_S = S_H/S_{П}, \quad (3)$$

где  $S_H, S_{II}$  – площади нагрева и пайки соответственно.

Результаты измерений показывают, что бесконтактный нагрев концентрированными потоками электромагнитной энергии имеет более высокую скорость по сравнению с монтажным паяльником. В паяльнике перенос тепла осуществляется за счет теплопроводности жала, которое служит аккумулятором тепла, выделяемого нагревателем, расположенном на стержне. Взаимосвязь температуры жала длиной  $L$  в рабочей зоне  $T_{жс}$  и зоне нагрева  $T_H$  выражена соотношением:

$$T_{жс} = \frac{T_H}{ch(\beta \cdot L)}. \quad (4)$$

Обобщенный параметр  $\beta$  равен

$$\beta = \sqrt{\alpha \cdot \Pi / \lambda \cdot S} = \sqrt{4\alpha / \lambda \cdot D}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи поверхности;  $\Pi$  – периметр жала;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $D$  – диаметр.

Расчет по формуле (5) для медного стержня паяльника диаметром 6 мм дает значение  $\beta = 3,12$ , тогда  $T_{жс} = T_H/1,2$ . В установившемся режиме количество теплоты, накопленное в медном стержне, зависит от мощности нагревателя и его температура может быть определена:

$$\Delta T = I^2 \cdot R \cdot t / c \cdot m, \quad (6)$$

Расчетные зависимости по формуле (6) (рис. 1) согласуются с экспериментальными данными в режиме теплового баланса. Для более точных расчетов необходимо учитывать потери тепла на теплоотдачу к защитному кожуху и на излучение от поверхности стержня.

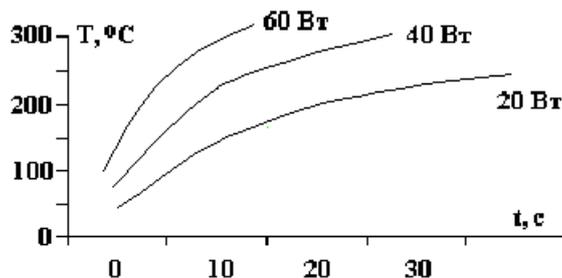


Рис. 1. Температурные зависимости паяльника.

Анализ температурных зависимостей в зоне пайки SMD при различных вариантах нагрева (рис. 2) показывает, что к числу "медленных" источников концентрированных потоков энергии относятся паяльник и диффузный ИК нагрев, у которых скорость нагрева в зоне пайки находится в пределах 20-50°С/с, что недостаточно для автоматизированных процессов. Повышение локальности ИК нагрева за счет светоотражающей маски не оказывает существенного воздействия на скорость нарастания температуры, уменьшая в целом только нагрев паяемой платы. Применение отражающего рефлектора для ИК источника позволяет достичь интенсивности нагрева до  $120 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>, повысить локальность нагрева, заменить водяное охлаждение воздушным принудительным (см. таблицу).

Для пайки малогабаритных и миниатюрных деталей эффективен нагрев ВЧ электромагнитными колебаниями (3), локализованный в зоне магнитопровода [6]. В этом случае интенсивность нагрева в четыре раза выше, чем для монтажного паяльника, а скорость нагрева при максимальном значении коэффициента перекрытия зазора достигает 80°С/с. Однако наличие значительной напряженности ЭМ поля (до  $3 \cdot 10^4$  А/м) в рабочей зоне может вызвать повреждение полупроводниковых приборов и интегральных микросхем за счет наводок.

Комбинированное воздействие ВЧ в сочетании с ИК (4) создает высокую скорость нагрева (до 150°С/с), но отличается более сложной технической реализацией и управлением. Наибольшей эффективностью по энергетическим и геометрическим параметрам обладает нагрев лазерным излучением, реализуемый от твердотельных ОКГ в непрерывном или импульсном режимах. Интенсивность нагрева зависит от диаметра лазерного луча, сфокусированного в зоне пайки:

$$E = \frac{4W}{\pi \cdot d^2 \cdot \tau_u}, \quad (7)$$

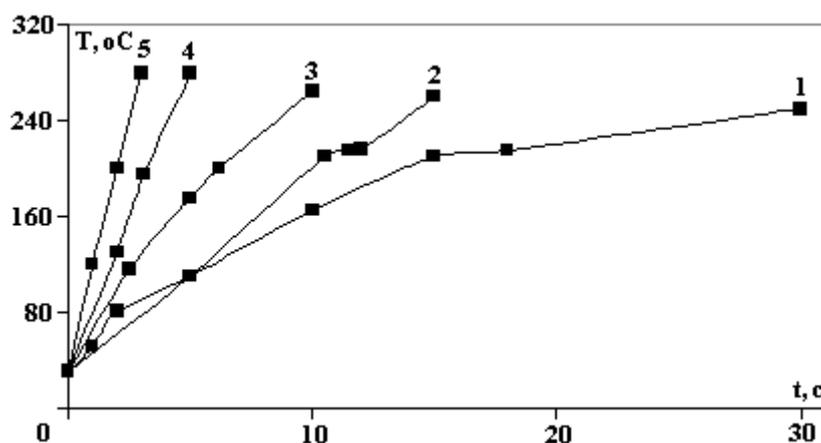


Рис. 2. Температурные зависимости в зоне пайки при различных вариантах нагрева: паяльником (1), ИК (2), ВЧ (3), ВЧ и ИК (4), лазером (5).

Эффективность нагрева концентрированными потоками энергии

Источники нагрева	$P_{y0}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·10 <sup>4</sup>	Максимальная плотность энергии, Вт/см <sup>2</sup>	Локальность, $K_s$
Паяльник	10–20	10 <sup>5</sup>	≥1
Инфракрасный:			
диффузный	50	10 <sup>6</sup>	≥10
сфокусированный	120	10 <sup>7</sup>	≥1
Высокочастотный:			
индуктором	200	10 <sup>8</sup>	≥5
в зазоре магнитопровода	80	10 <sup>7</sup>	≥1
ИК+ВЧ	150	5·10 <sup>8</sup>	≥1
Лазерный луч	500	10 <sup>12</sup>	≤1

где  $W$  – энергия в импульсе, которая для плавления материала без выплеска равна

$$W = \frac{0,885 \cdot T_{пл} \cdot \lambda \cdot \pi \cdot r^2}{\sqrt{a \cdot \tau_u}}, \quad (8)$$

где  $T_{пл}$  – температура плавления материала,  $\lambda$ ,  $a$  – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности,  $r$  – радиус луча.

Моделирование лазерного воздействия в импульсном режиме в виде серии непрерывно действующих источников теплоты позволило получить выражение, описывающее изменение температуры зоны нагрева в 3-х мерном пространстве.

$$T_\tau = T_0 + \left( \frac{A \cdot P}{\kappa} \right) \cdot \sqrt{\frac{\chi}{\pi}} \cdot \left[ \frac{\Phi \left( \frac{t}{f} - \tau \right) \cdot e^{-\left( \frac{x^2 + y^2}{r^2 + 4\chi \cdot \left( \frac{t}{f} - \tau \right)} \right)}}{\sqrt{\frac{t}{f} - \tau} \cdot \left( r^2 + 4\chi \cdot \left( \frac{t}{f} - \tau \right) \right)} \right] \cdot \left( e^{-\left( \frac{(z+2h)^2}{4\chi \cdot \left( \frac{t}{f} - \tau \right)} \right)} + e^{-\left( \frac{(2h-z)^2}{4\chi \cdot \left( \frac{t}{f} - \tau \right)} \right)} \right), \quad (9)$$

где  $T_0$  – начальная температура;  $A$  – КПД лазерной установки;  $P$  – средняя мощность излучения;  $f$  – частота следования импульсов;  $t$  – время воздействия;  $\tau$  – длительность импульса;  $x, y, z$  – расстояния от центра пятна излучения;  $\chi$  – коэффициент температуропроводности;  $\kappa$  – коэффициент теплопроводности;  $\Phi$  – интеграл ошибок Гаусса;  $h$  – толщина объекта нагрева.

Заданная температура пайки должна достигаться за два импульса при частоте 10 Гц. Экспериментальные исследования температуры в зоне нагрева лазерным лучом при напряжении питания ИК лампы накачки 700 В [7] (рис. 3) показали, что скорость нарастания температуры на начальном участке зависит от частоты ОКГ и диаметра луча. Для частоты 10 Гц при диаметре луча 5 мм она равна 200 °С/с, для диаметра луча 1 мм – 400 °С/с. С уменьшением частоты импульсов до 3 Гц скорость нагрева снижается до 50 °С/с.

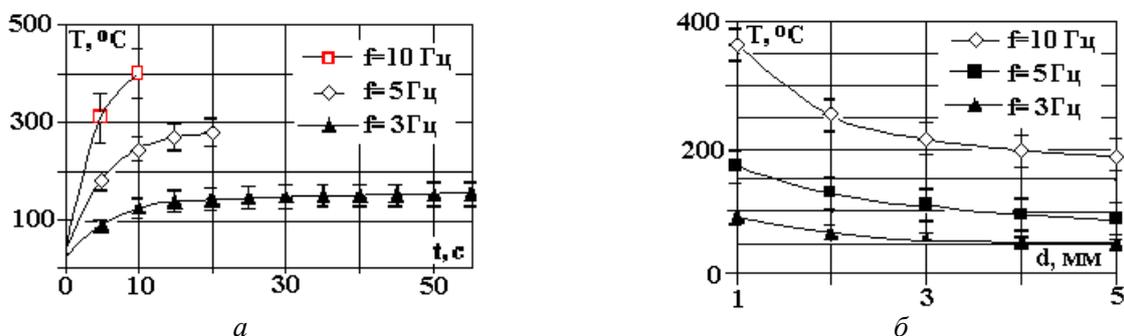


Рис. 3. Зависимости температуры нагрева зоны пайки от времени облучения (а), от диаметра луча (б) и частоты импульсов.

С увеличением частоты импульсов и уменьшением диаметра луча температура в зоне пайки значительно возрастает. Однако слишком малый диаметр луча при высокой частоте импульсов приводит к перегреву и испарению припоя, повреждению паянных деталей. Оптимальное время расплавления припоя составляет 0,2–0,3 с, что удовлетворяет требованиям высокой скорости формирования контакта и минимального воздействия на прилегающие к зоне нагрева области платы и корпусов паянных элементов.

Исследования показывают, что перспективы научных исследований и практических разработок в области процессов пайки в электронике связаны с использованием комбинированных методов активации, имеющих высокую прецизионность и регулируемость потоков энергии, и позволяют создать микропроцессорное программно-управляемое оборудование и обеспечить высокое качество монтажных соединений в условиях дефицита материалов и энергии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Thwaites C. J. Soldering technology - a decade of development // Int. Metals Rev. 1984. 29. N2. P. 45–74.
2. Loten mit Induktion // Schweiz. Maschinenmarkt. 1995. 96. N. 37. S. 47–48.
3. Белов А.А. Применение устройств локального радиационного нагрева с галогенными лампами накаливания при пайке // Пайка в создании изделий современной техники. М., ЦРДЗ, 1997. С. 93–94.
4. Ланин В.Л., Бондарик, В.М., Задруцкий И.А. Лазерная пайка электронных сборок // Известия Белорусской инженерной Академии. 1999. № 1 (7). 2. С. 183–184.
5. Bliefrei Loten – News und Inform. // Productronic. 1999. 19. N12. S.10.
6. Румак Н. В. Ланин В. Л. Чернышев И. Н. Экономичный бесконтактный нагрев энергией магнитного поля // Весці АНБ, сер. физ.-техн. навук. 1994. № 2. С. 94–96.
7. Lanin V.L., Bondarik V.M., Zadrutskiy I.A., Lazier Soldering Surface Mount Components // Elektronika ir Elektrotechnika. 1999. № 4. С. 32–34.

Поступила 10.12.2001

#### Summary

The power and geometrical parameters of effect of electromagnetic energy as fields and radiant fluxes on a zone of formation of soldered electrical connections of electronic components are investigated. The reflecting reflector in a IR source augments intensity of heating up to  $120 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$ . Combined effect of a HF and the IR radiation creates high speed of heating (up to  $150^\circ\text{C/c}$ ), but differs by more composite technical implementation and control. The rate of onset of temperature at laser effect depends on a pulse frequency and diameter of a beam.