

Индукционный нагрев шариковых выводов припоя для монтажа корпусов BGA

В. Л. Ланин, И. И. Сергачев, В. Т. Хотькин

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь, e-mail: vlanin@bsuir.by

Исследован процесс индукционного нагрева при формировании шариковых выводов припоя из припойной пасты на контактных площадках печатных плат. Применение кольцевого индуктора с внутренним магнитопроводом из феррита позволило сконцентрировать силовые линии магнитного поля в рабочей зоне и обеспечить оптимальный температурный профиль нагрева при монтаже корпусов BGA со скоростью 40–50°C/с.

Ключевые слова: индукционный нагрев, выводы припоя, монтаж, корпуса BGA.

УДК 621.396.6

ВВЕДЕНИЕ

В современных электронных модулях все более широко применяются интегральные микросхемы в корпусе BGA, что дает возможность повысить плотность компоновки элементов и за счет сокращения длины выводов значительно повысить быстродействие электронной схемы. Для пайки корпусов BGA на контактных площадках платы необходимо сформировать матрицу шариковых выводов из припоя [1].

Шарики припоя на печатной плате можно формировать индукционным нагревом. Индукционный нагрев переменным электромагнитным полем позволяет осуществлять с высокой производительностью различные технологические процессы: термообработку, плавку, сварку, пайку, выращивание кристаллов и т.д. Вихревые токи в расплавах вызывают пондеромоторные силы, которые улучшают растекание по паяемым поверхностям и перемешивают многофазные структуры в жидких средах [2].

Проблемы повышения энергетических показателей и эффективности применения являются актуальными для всех устройств индукционного нагрева. Многовитковые индукторы соленоидального типа характеризуются значительным рассеиванием магнитного потока, низким КПД, необходимостью электрической и тепловой изоляции от нагреваемых деталей и водяным охлаждением во время работы. Благодаря индукционным нагревателям на магнитопроводах можно повысить локальность нагрева, снизить потребляемую мощность, избавиться от водяного охлаждения и от изоляции нагреваемых деталей, однако зона нагрева в данном случае ограничена размерами зазора магнитопровода [3].

Шарики припоя на контактных площадках формируют также индукционным нагревом в электромагнитном поле кольцевого индуктора (рис. 1) [4]. Оплавление припоя за счет селективности индукционного нагрева позволяет избежать негативных эффектов, присущих традици-

онным методам. Перед индукционным оплавлением шарики припоя Sn3,5Ag диаметром 0,76 мм закрепляются на контактных площадках платы из стеклотекстолита FR4 толщиной 0,4 мм. Контактные площадки вскрывают от паяльной маски с размером окна 0,6 мм. При токе в индукторе до 29 А и частоте 300 кГц оплавление шариков припоя происходило за 2–3 с. Правильная геометрическая форма шариков обеспечивала хорошее качество паяных соединений BGA.

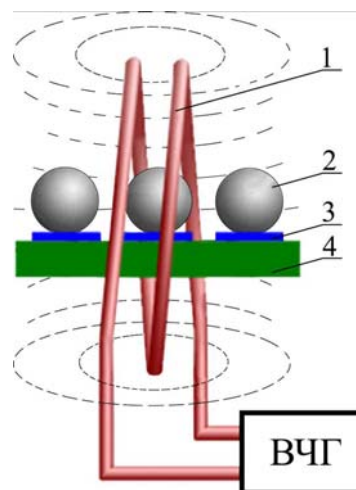


Рис. 1. Схема индукционного нагрева для формирования шариков припоя: 1 – индуктор; 2 – шарик; 3 – контактная площадка; 4 – плата.

Однако для паяльных паст, которые состоят из порошка припоя с диаметром частиц 50 мкм или менее, распределенных во флюсе, эффективность индукционного нагрева незначительна и не приводит к оплавлению. Неспособность к эффективному расплавлению паяльной пасты ограничивает применимость этой технологии в серийном производстве.

Цель работы – оптимизация параметров индукционного нагрева кольцевым индуктором с внутренним магнитопроводом для формирования шариковых выводов припоя из паяльной пасты на контактных площадках печатной платы в электронных модулях.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Для эффективной работы кольцевого индуктора с внутренним магнитопроводом необходимо оптимизировать частоту и амплитуду тока возбуждения, а также получить распределение вихревых токов в нагреваемых объектах и переменного магнитного поля в пространстве. Оптимизировать необходимые параметры индукционной системы можно с помощью современных прикладных пакетов моделирования, основанные на методе конечных элементов.

Для моделирования индукционного устройства выбран пакет *ANSOFT MAXWELL*, который позволяет рассчитывать гармонические электромагнитные и электрические поля, а также переходные процессы. Наличие модуля расчета распределения вихревых токов, наведенных переменным электромагнитным полем, дает возможность моделировать работу устройств индукционного нагрева [5].

Методика моделирования распределения электромагнитных полей в данном приложении включает: создание геометрической модели, задание свойств материала, источника возбуждения, граничных условий, настройку опций расчета и сетки, решение задачи распределения, просмотр и анализ результатов. Для моделирования в пакете *ANSOFT MAXWELL* построена геометрическая модель индукционного устройства, которая состояла из кольцевого индуктора из медной трубки диаметром 5,0 мм и магнитопровода ферритового. Заданы граничные условия непрерывности: поле H непрерывно при пересечении границ объектов; условие Неймана на границе области моделирования – поле H не пересекает границы области моделирования. Выбраны параметры построения сетки конечных элементов и модель разбита на конечные элементы.

В основу расчетов программы заложены фундаментальные уравнения электромагнитного поля [6]. Первое уравнение Максвелла (закон полного тока) – изменяющееся во времени t электрическое поле в пределах элемента поверхности dS создает магнитное поле:

$$\oint \mathbf{H} dl = \int \mathbf{J} dS + \int \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} dS, \quad (1)$$

где H – напряженность магнитного поля; D – электрическое смещение; J – плотность тока.

Второе уравнение Максвелла (закон электромагнитной индукции) – изменение магнитной индукции во времени создает электрическое поле:

$$e = \oint \mathbf{E} dl = - \frac{\partial}{\partial t} \int \mathbf{B} dl, \quad (2)$$

где B – магнитная индукция; E – напряженность электрического поля.

Важным фактором, влияющим на характер и эффективность индукционного нагрева, является наличие скин-эффекта. Скин-слой определяется расстоянием δ , на котором величина вихревых токов уменьшается до $1/e$ от своего первоначального значения и рассчитывается как

$$d_s = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}}, \quad (3)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление; μ – магнитная проницаемость; μ_0 – относительная магнитная проницаемость; ω – магнитная угловая частота; f – частота.

Поверхностная плотность активной мощности, выделяемой в металле в среднем за период T , определяется выражением [7]:

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T E(0)H(0)dt = 2 \cdot 10^{-3} (I_0 W_0)^2 \sqrt{\rho \mu f}, \quad (4)$$

где I_0 – действующее значение тока; W_0 – плотность намотки витков (1/м).

При моделировании принято, что конвективный теплообмен в расплавленных шариках припоя можно проигнорировать из-за его незначительного влияния на распределение температуры в данном исследовании, скрытая теплота фазового перехода шариков припоя учитывается, а все материалы изотропны. Математическое уравнение энергии для расчета температурного поля пакета выглядит следующим образом:

$$\rho c_p \frac{\alpha T}{\alpha t} = \lambda (\nabla^2 T) + q, \\ \rho c_p \frac{\rho}{\mu_r \cdot f} = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}}, \quad (5)$$

где ρ – плотность материала; C_p – удельная теплоемкость; λ – теплопроводность; q – плотность энергии источника тепла, которая генерируется индуцированными вихревыми токами.

Плотность теплового потока, создаваемого вихревыми токами,

$$q = \beta (T - T_0), \quad (6)$$

где T и T_0 – температуры поверхности и окружающей среды соответственно, β – коэффициент теплопередачи.

В результате моделирования процесса индукционного нагрева кольцевым индуктором с внутренним ферритовым магнитопроводом при токе в обмотках возбуждения в пределах от 1 до 2 А на частоте 2 МГц получено распределение температур в шариковых выводах на печатной плате (рис. 2). Использование магнитопровода позволяет достичь на 60% более равномерного прогрева всех шариков припоя на печатной плате, а также высокой скорости нагрева по сравнению с вариантом без магнитопровода. Модели

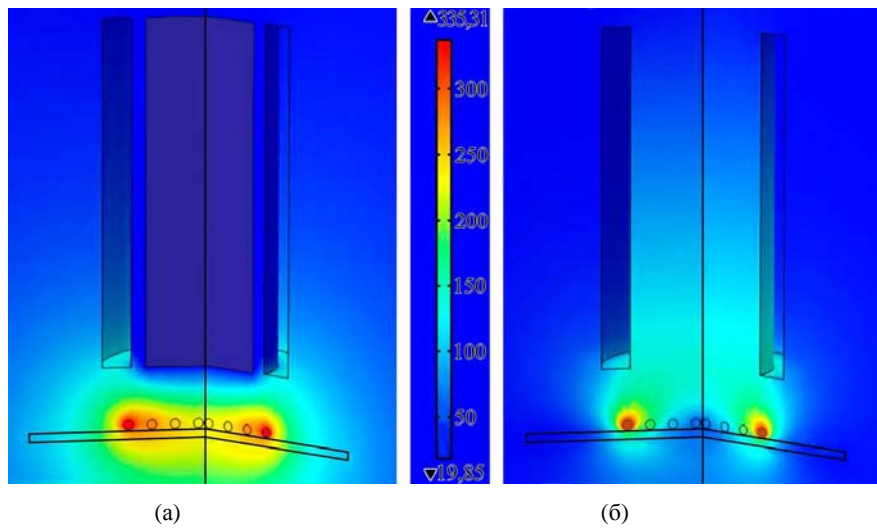


Рис. 2. Тепловые поля в шариковых выводах припоя на печатной плате при индукционном нагреве кольцевым индуктором с магнитопроводом (а) и без него (б).

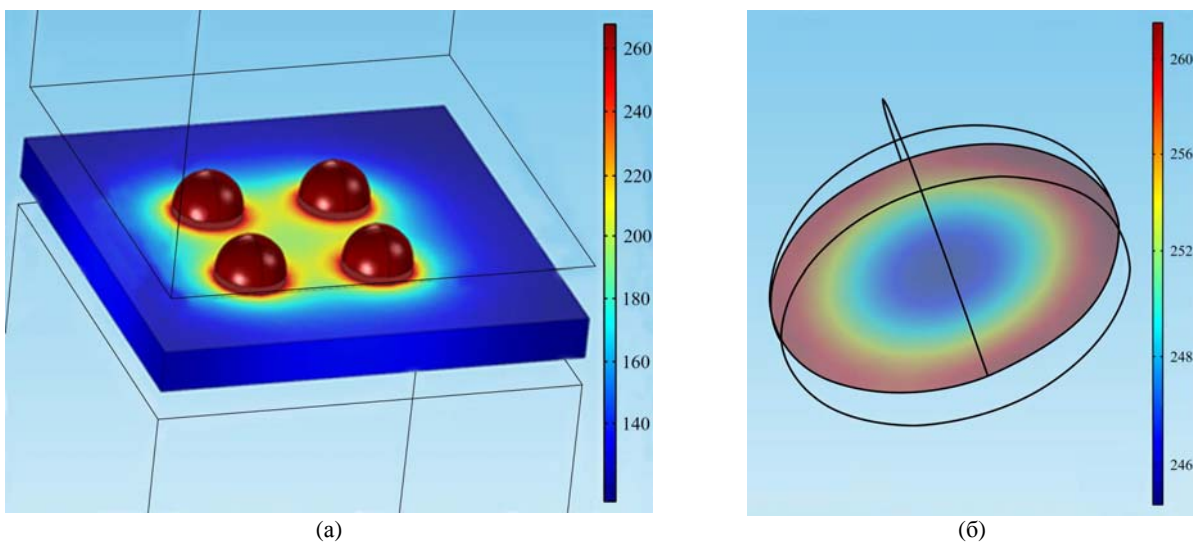


Рис. 3. Модели распределения температуры при индукционном нагреве платы (а) и шарика припоя (б).

температурных полей в шариках припоя (рис. 3) свидетельствуют о преимущественно поверхностном характере высокоскоростного индукционного нагрева [8]. При наличии магнитопровода, концентрирующего магнитное поле в индукторе, скорость нагрева может достигать $50^{\circ}\text{C}/\text{с}$ (рис. 4).

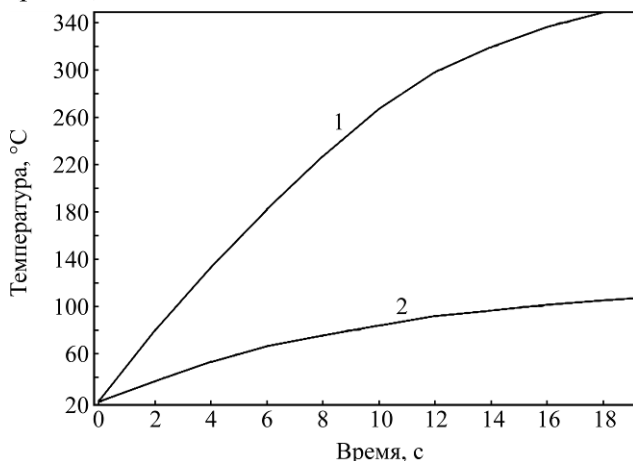


Рис. 4. Температурные зависимости в зоне нагрева кольцевого индуктора с магнитопроводом (1) и без него (2).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Разработано индукционное устройство для формирования шариковых выводов из паяльной пасты на контактных площадках печатной платы, содержащее кольцевой индуктор 1 и внутренний магнитопровод 2 (рис. 5). Индукционное устройство подключалось к высокочастотному генератору ВЧГ через конденсаторный блок согласования БС реактивного сопротивления индуктора с генератором. Шариковые выводы из припоя 3 формировались на контактных площадках платы 6, закрепленной на теплоизоляционном основании 4. Температуру в рабочей зоне нагрева измеряли с помощью термопары ХК, прикрепленной внутрь шарикового вывода и соединенной с цифровым измерителем температуры ТРМ 210. Для контроля температурного профиля индукционного нагрева и частоты генератора применялся персональный компьютер, имеющий следующие характеристики: OS Windows XP, CPU Intel Pentium Dual-Core E5400 2700MHz, RAM 2,0 Гб.

Для автоматизированного измерения параметров прибор ТРМ210 подключался к персональному компьютеру посредством встроенного интерфейса RS-485 с использованием автоматического преобразователя интерфейсов USB/R5-485 ОВЕН АС4.

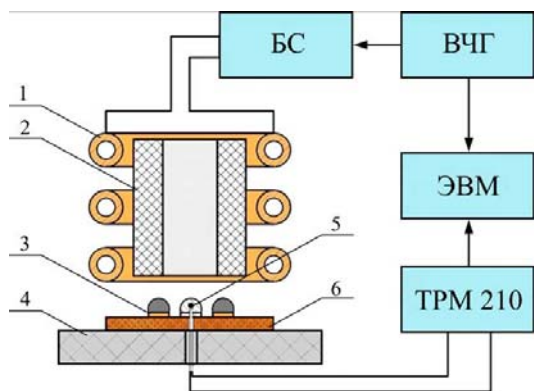


Рис. 5. Схема нагрева кольцевым индуктором с внутренним магнитопроводом: 1 – индуктор; 2 – магнитопровод; 3 – шарик припоя; 4 – рабочий столик; 5 – терморпара; 6 – печатная плата.

Высокочастотным генератором служил ламповый генератор ВЧГ2-1/1,76, предназначенный для питания технологических устройств индукционного нагрева на различных технологических операциях. Генератор имеет плавную перестройку частоты в диапазоне 1,0–2,0 МГц, регулировку мощности нагрева и защиту по максимальному току.

Индукционный нагрев можно также осуществлять с помощью настольных транзисторных генераторов мощностью до 5,0 кВт, например R5001 АКТАН.

Для формирования шариков припоя использовалась паяльная паста SEV-V951IX-9 КОКИ KOREA, которая наносилась дозатором ПП-34Ц или ракелем с трафаретом. Шарiki формировались на печатной плате с шагом координатной сетки 1,5, на которой имелась матрица контактных площадок печатной платы. Для их подготовки к нанесению пасты использовался жидкий флюс FluxPlus EFD. Качество и размеры шариков припоя в диапазоне диаметров 0,4–0,76 мм контролировались посредством стереомикроскопа Carton NSWT-620.PFM-X с 10- и 30-кратным увеличением.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ температурных профилей нагрева шариковых выводов припоя (рис. 6) показал, что скорость роста температуры в значительной степени зависит от мощности нагрева и может достигать 40°C/с и более. Однако при большей скорости нагрева трудно обеспечить более пологий участок при температуре плавления припоя,

когда происходят смачивание паяемых поверхностей и растекание припоя. Отсутствие этого участка в условиях интенсивного нагрева приводит к преждевременному испарению флюса, перегреву припоя и, как следствие, к ухудшению качества формируемых шариковых выводов. В результате закипания флюса имеет место разбрызгивание припоя в виде мелких шариков на поверхности платы.

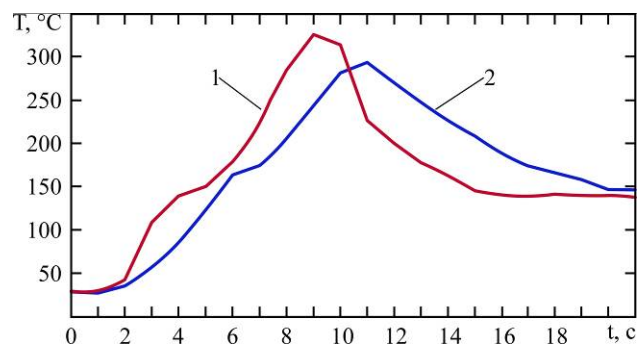


Рис. 6. Температурные профили шариковых выводов припоя при мощности нагрева, кВт: 1 – 1,2; 2 – 0,9.

Проверка качества сформированных шариков припоя на микроскопе Carton NSWT-620.PFM-X показала, что разброс значений по диаметру шарика 0,76 мм составил 10–20 мкм, что свидетельствует о том, что их разогрев в процессе формирования был достаточно равномерный.

Скорость нагрева электромагнитным полем растет пропорционально энергии однородного магнитного поля, создаваемого кольцевым индуктором:

$$W = \mu\mu_0 \frac{N^2 I^2 S}{2l}, \quad (7)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; μ – относительная магнитная проницаемость магнитопровода; N – число витков индуктора; I – сила тока в индукторе; S – площадь сечения поля внутри индуктора; l – длина намотки.

С увеличением числа ампер-витков в индукторе и магнитной проницаемости магнитопровода увеличивается энергия магнитного поля, растет плотность вихревых токов, наводимых электромагнитным полем в частицах припоя в пасте. Для индуктора с 10 витками диаметром 40 мм и внутренним магнитопроводом с относительной магнитной проницаемостью 100 на частоте 2 МГц скорость нагрева составляла 40–50°C/с.

ВЫВОДЫ

Для формирования шариковых выводов припоя, предназначенных для монтажа интегральных электронных компонентов в корпусе BGA, эффективен индукционный нагрев кольцевым индуктором с внутренним магнитопроводом. Шариковые выводы припоя заданных размеров

образуются оплавлением паяльной пасты, нанесенной на контактные площадки печатной платы. Для индуктора с 10 витками диаметром 40 мм и внутренним магнитопроводом с относительной магнитной проницаемостью 100 на частоте 2 МГц скорость нагрева достигает 40–50°C/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ли Н.-Ч. *Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и Flip-Chip технологии*. М.: ИД «Технологии», 2006. 392 с.
2. *Induction Heating Industrial Applications*. Ed. by S. Lupi. Paris: U.I.E., 1992. 142 p.
3. Lanin V.L., Sergachev I.I. Induction Devices for Assembly Soldering in Electronics. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2012, **48**(4), 384–388.
4. Hongbo X., Mingyu L. Lead-Free Soldering Technique by Using Medium-Frequency Electromagnetic Field. *Proceeding 10th Electronics Packaging Technology Conference*, 9–12 Dec. 2008, Singapore, p. 1351–1357.
5. *MAXWELL 3D: Electromagnetic and Electromechanical Analysis*. Maxwell_3D_v11_full_book.pdf.
6. Татур Т.А. *Основы теории электромагнитного поля*. М.: Высшая школа, 1989. 271 с.
7. Сысун В., Белкин В., Подопригора А. Индукционный нагрев ферромагнитной среды в режиме насыщения. *Фундаментальные исследования*. 2004, **3**, 132–134.
8. Lanin V.L. High-Frequency Heating for Soldering in Electronics. *Circuits and Systems*, 2012, **3**, 238–241.

Поступила 12.12.13

Summary

The investigation has been performed of the process of the induction heating at the formation of solder balls from solder pastes on printed-circuit board contact pads. Application of the ring inductor with an internal magnetic circuit from ferrite has allowed us to concentrate the magnetic field power lines in the working zone and provide an optimum temperature profile of heating during mounting of the BGA packages with the speed of 40–50°C/s.

Keywords: induction heating, solder balls, mounting, BGA package.