

Формирование матричных шариковых выводов с использованием индукционного нагрева

УДК 621.791.16 | ВАК 05.27.06

В. Ланин, д. т. н.¹, А. Хацкевич²

Воздействие энергии высокочастотных электромагнитных колебаний позволяет осуществлять высокопроизводительный бесконтактный нагрев в различных процессах пайки электронных компонентов, а также для формирования шариковых выводов на печатных платах и подложках. Для обеспечения формирования таких выводов создана система индукционной пайки на основе ZVS-генератора (ZVS – Zero Voltage Switch) с использованием магнитопровода и концентраторов вихревых токов различной геометрической конфигурации. Проведена оценка тепловых полей в зоне нагрева шариков припоя на контактных площадках печатной платы и оптимизирован профиль индукционного нагрева. Получены зависимости влияния геометрической формы концентратора вихревых токов на качество паяемых выводов.

ФОРМИРОВАНИЕ ПАЯЕМЫХ ВЫВОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Формирование выводов для монтажа Flip-Chip представляет сложный и многоэтапный технологический процесс. Для формирования массива шариковых выводов (рис. 1) на подложке необходимо правильно выбрать материалы микровыводов и способы нагрева, обеспечивающие локализацию мощности и малые зоны термического влияния. Формирование микровыводов требует существенных вложений в технологическое оборудование и инфраструктуру, а также разработки сложной технологии. Для небольшого размера микросборок необходимы методы локального нагрева. Создание межсоединений между многослойными структурами 2,5- и 3D-конструкций посредством объемных припойных шариковых выводов в современной микроэлектронике является сложной технологической задачей.

Бампы припоя на плате можно формировать индукционным нагревом, создающим вихревые токи и пондеромоторные силы в расплаве припоя, которые улучшают растекание припоя и перемешивают многофазные структуры в жидких средах. Повышение

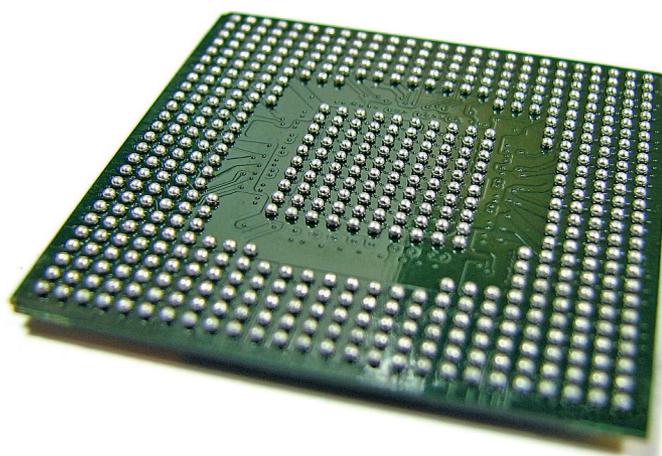


Рис. 1. Матрица шариковых выводов

эффективности индукционного нагрева является актуальной задачей.

Индукторы соленоидального типа характеризуются значительным рассеиванием магнитного потока, низким КПД, необходимостью электрической и тепловой изоляции от нагреваемых деталей и водяного охлаждения во время работы. Применение индукционных устройств на магнитопроводах из феррита позволяет 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 [1].

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, профессор, vlanin@bsuir.by.

² Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, инженер, dvpodt94@mail.ru.

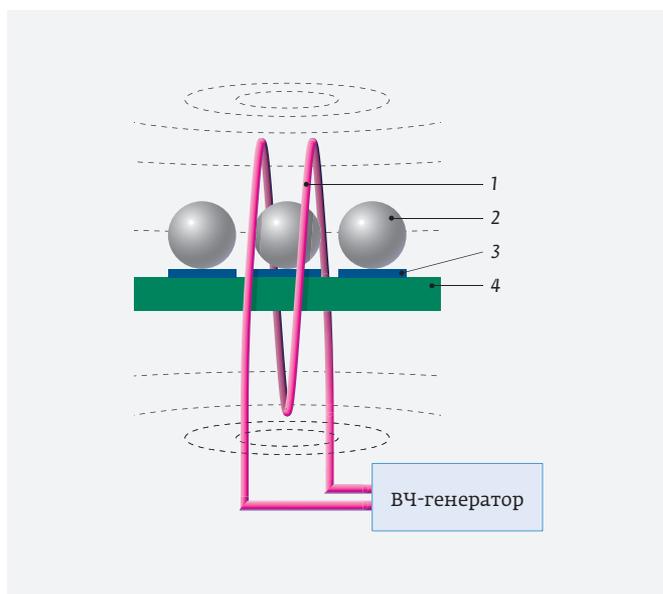


Рис. 2. Схема индукционного нагрева для формирования шариков припоя: 1 – индуктор; 2 – шарик; 3 – контактная площадка; 4 – плата

При формировании шариков припоя на контактных площадках в электромагнитном поле кольцевого индуктора (рис. 2) за счет селективности индукционного нагрева можно избежать негативных эффектов, присущих традиционным методам. Шарик припоя Sn3,5Ag диаметром 0,76 мм закреплялись на контактных площадках платы из стеклотекстолита FR4. Контактные площадки вскрывали от паяльной маски с размером окна 0,6 мм. При токе в индукторе 29 А и частоте 300 кГц оплавление шариков припоя происходило за 2–3 с [2]. Правильная геометрическая форма шариков обеспечивала хорошее качество паяных соединений BGA.

Однако для паяльных паст, которые состоят из порошка припоя с диаметром частиц менее 50 мкм, распределенных во флюсе, эффективность индукционного нагрева сравнительно низка ввиду рассеивания электромагнитного поля в окружающем пространстве, что увеличивает длительность процесса. Данный метод индукционного нагрева обладает высокой энергоемкостью и низким КПД. Также необходимо создавать индуктор под каждый типоразмер микросхемы.

Для повышения эффективности индукционного нагрева применяют сусцепторы, которые обладают свойством поглощать электромагнитную энергию и превращать ее в тепло за счет вихревых токов [3]. Обычно это проводящий материал, который используется для передачи тепла объекту посредством проводимости или излучения. Сусцепторы часто изготавливают из графита из-за его высокого электрического сопротивления и хорошей механической обрабатываемости, а также

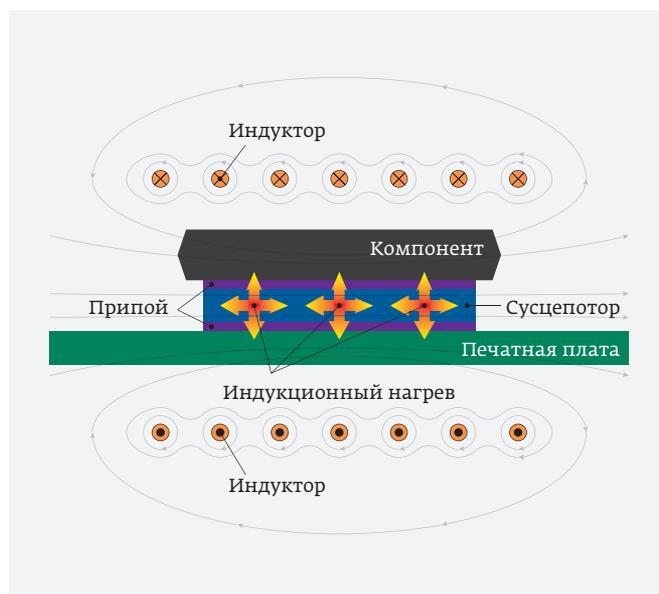


Рис. 3. Схема индукционного нагрева сусцепторных элементов

интервала температур до 3000 °С. В качестве альтернативы они могут производиться из нержавеющей стали, молибдена, карбида кремния, алюминия или других проводящих материалов.

Местом для преобразования тепловой энергии в электромагнитном поле является материал-сусцептор, который помещается внутри или вблизи припоя (рис. 3). Переменное магнитное поле генерирует в сусцепторе индукционный ток, противоположный току в индукторе, который, в свою очередь, приводит к возникновению переменного магнитного поля, которое индуцирует дополнительный ток в нагреваемом материале соединения.

Для ферромагнитных сусцепторов из никеля, железа и сплава NiFe, которые располагаются в области пайки электронных компонентов, толщина слоя материала выбирается до 200 мкм для рабочей частоты 100 кГц. В этом случае при соотношении толщины к глубине проникновения вихревых токов от 3,5 до 1 обеспечивается высокий электрический КПД.

Более перспективным методом формирования шариковых выводов является индукционный нагрев в зазоре индукционной катушки и замкнутого магнитопровода с использованием концентраторов вихревых токов, представляющих собой накладки из материала с высокой электропроводностью, прижимаемые при пайке к обратной стороне подложки. Данный метод обеспечивает высокую локализацию мощности в зоне нагрева, обладает высоким коэффициентом полезного действия, экологически чист, может использоваться в инертных средах.



Рис. 4. Структурная схема ZVS-генератора

КОНСТРУКЦИЯ ПРОТОТИПА УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ

Прототип установки индукционной пайки шариков припоя в зазоре магнитопровода выполнен по схеме ZVS-генератора, работающего в импульсном режиме [4]. Основным преимуществом импульсного режима работы является низкий уровень потерь и высокое значение КПД, что особенно важно для преобразователей среднего и высокого диапазона мощностей. Коммутация силового ключа в индуктивной цепи должна производиться активным способом в любой определенный момент времени. При бесконечно коротком времени переключения динамические потери мощности отсутствуют, и всё напряжение падает непосредственно на индуктивности коммутируемой цепи. В реальных схемах размыкание ключа, пропускающего ток, невозможно без преобразования энергии, запасенной в индукторе. Преобразование не происходит только в том случае, когда пропускаемый ток равен нулю. Такое состояние называется пассивным выключением, так как момент перехода через ноль зависит от характера протекания тока в конкретной цепи. Участвующий в этом транзистор является коммутатором нулевого тока ZCS (Zero Current Switch).

При нулевом напряжении включение происходит в «идеальном» режиме без рассеяния мощности. Как и в предыдущем случае, оно является пассивным, поскольку форма напряжения на транзисторе определяется конкретной схемой, и оно принимает нулевое значение только в определенные моменты времени. Работающий таким образом ключ, соответственно, называется коммутатором нулевого напряжения ZVS. Структурная схема ZVS-генератора представлена на рис. 4.

Ключи с коммутацией при нулевом напряжении разрабатываются исходя из возможности активного выключения и пассивного включения при спаде напряжения до нуля. Активное запирающее с малыми потерями достигается благодаря установке параллельно ключу достаточно большой емкости. Снижение потерь здесь, как и в предыдущем случае, обеспечивается только при одном способе управления: это PSM (Pulse Shift Modulation – модуляция за счет сдвига импульса). Меньший уровень рассеиваемой мощности, однако, позволяет работать на более высоких частотах, чем при «жестком» переключении.

Устройство выполнено в компактном корпусе, который содержит блок питания, силовую часть, конденсаторную батарею и микроконтроллерный блок управления. Для предотвращения перегрева катушки индуктора в устройстве реализовано водяное охлаждение. Для мониторинга и управления основными параметрами прототипа используется микроконтроллер STM32, контролирующий основные параметры тока в катушке, напряжения, частоты задающего генератора, а также температуру силовых



Рис. 5. Внешний вид прототипа устройства индукционной пайки

MOSFET-транзисторов и воды в индукторе в соответствии с информацией, поступающей от подключенных к нему датчиков температуры.

Мощность установки 24–30 Вт. Частота задающего генератора находится в диапазоне 500–1000 кГц. На передней панели устройства расположен дисплей, на котором отображаются текущие значения частоты и мощности индукционного нагрева. Внешний вид прототипа устройства индукционной пайки шариков припоя показан на рис. 5.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА НА ЗАМКНУТОМ МАГНИТОПРОВОДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕНТРАТОРОВ

Шарики припоя диаметром 0,76 мм закрепляются на контактных медных площадках платы толщиной 2 мм из стеклотекстолита FR4. Использование концентраторов вихревых токов, изготовленных из меди, позволяет добиться локализации электромагнитной энергии на поверхности платы. В работе исследовались различные геометрические конфигурации концентраторов вихревых токов, которые представлены на рис. 6.

Для оптимизации параметров индукционного нагрева проведено моделирование тепловых полей в зоне нагрева шариков припоя на контактных площадках печатной платы в программном пакете COMSOL Multiphysics. Исходные параметры для моделирования представлены в табл. 1, а тепловые поля – на рис. 7 и 8.

При индукционном нагреве без концентратора вихревых токов шарики припоя вследствие краевого эффекта нагреваются только на крайних контактных площадках и только до 160 °С, что недостаточно для их оплавления.

Нагрев шариков припоя на контактных площадках печатной платы с концентратором вихревых токов в виде сплошной металлической поверхности достаточно равномерный с температурой 200 °С, обеспечивающей качественное оплавления шариков припоя и закрепления их на плате.

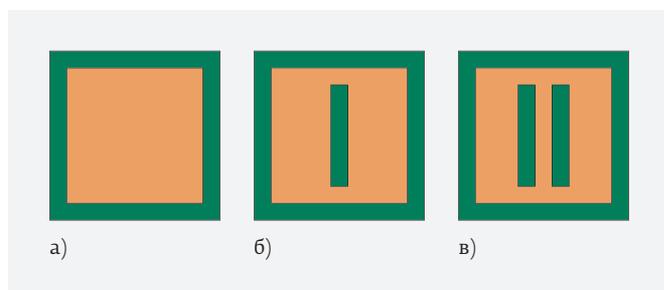


Рис. 6. Конфигурация концентраторов вихревых токов: а – сплошной; б – с разрезом; в – с двумя разрезами

Таблица 1. Исходные параметры для моделирования

Материал припоя	60Sn-40Pb
Диаметр шарика, мм	0,76
Сила тока в индукторе, А	2
Частота, кГц	432
Время нагрева, с	0–60

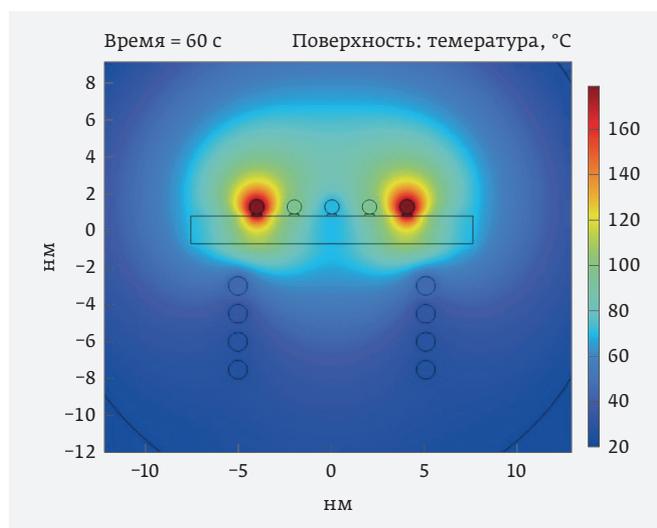


Рис. 7. Тепловые поля в зоне нагрева шариков припоя на контактных площадках печатной платы без концентратора

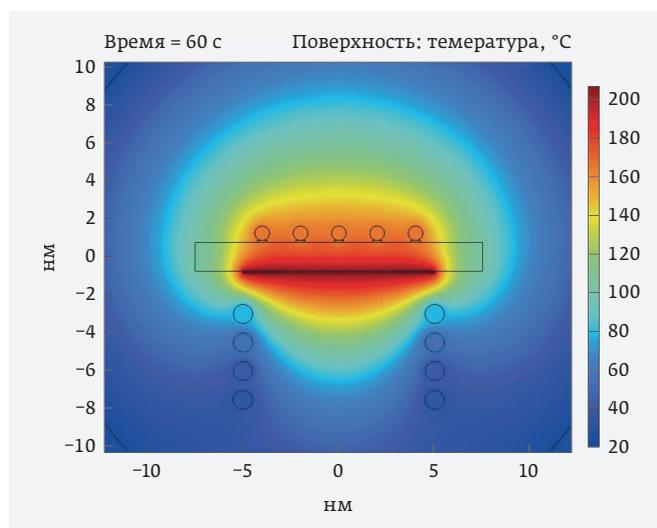


Рис. 8. Тепловые поля в зоне нагрева шариков припоя на контактных площадках печатной платы с концентратором вихревых токов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для измерения напряженности магнитного поля использовалась измерительная рамка в виде витка медной проволоки, в котором при внесении в электромагнитное поле генерируется разность потенциалов, измеряемая блоком оцифровки сигналов. Напряженность поля была максимальна в центре зазора магнитопровода индукционного устройства и рассчитывалась по формуле:

$$H = \frac{1,26 \cdot U}{f \cdot a} \cdot 10^5, \text{ А/м} \quad (1.1)$$

где U – напряжение, В; f – частота, МГц; a – сторона измерительной рамки, мм².

Параметры магнитного поля для различных типов концентраторов вихревых токов и получаемые при этом размеры шариков припоя приведены в табл. 2.

Термопрофили индукционной пайки шариков припоя с различными типами концентраторов представлены на рис. 9. Наибольшая скорость нагрева (до 8 °С/с) получена для сплошной поверхности концентратора вихревых токов. Однако при этом возможен перегрев печатной платы.

Термопрофили нагрева печатной платы в процессе индукционной пайки шариков припоя представлены на рис. 10. При измерениях термopара закреплялась припойем ПОС 10 на контактных площадках платы. Как видно из графиков, конфигурация концентраторов с разрезом увеличивает скорость нагрева шариков припоя. Это происходит из-за токов Фуко, текущих в концентраторе по замкнутому контуру. Поэтому такие концентраторы вихревых токов не перегревают печатную плату.

Сформированные шарики припоя соответствуют размерам контактной площадки и имеют правильную форму и блестящую поверхность, что свидетельствует об отсутствии перегрева. Внешний вид платы с сформированными шариками припоя приведен на рис. 11.

Таблица 2. Параметры магнитного поля для различных типов концентраторов

Тип концентратора	Напряженность магнитного поля, А/м · 10 ⁵	Средняя высота шариков припоя, мкм
1. Сплошной	3,83	440
2. С разрезом	3,87	351
3. С двумя разрезами	3,88	454

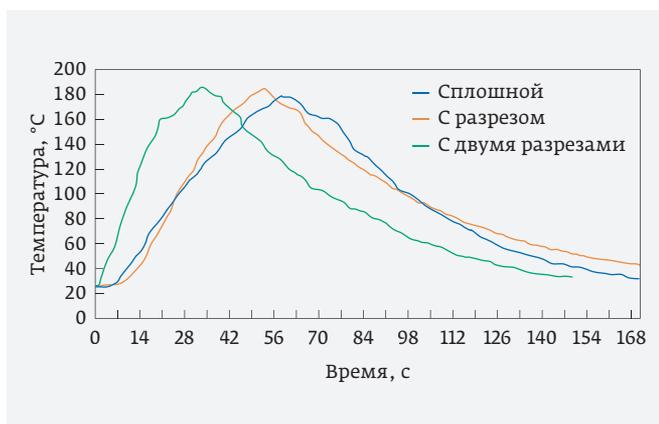


Рис. 9. Термопрофили индукционной пайки для различных типов концентраторов

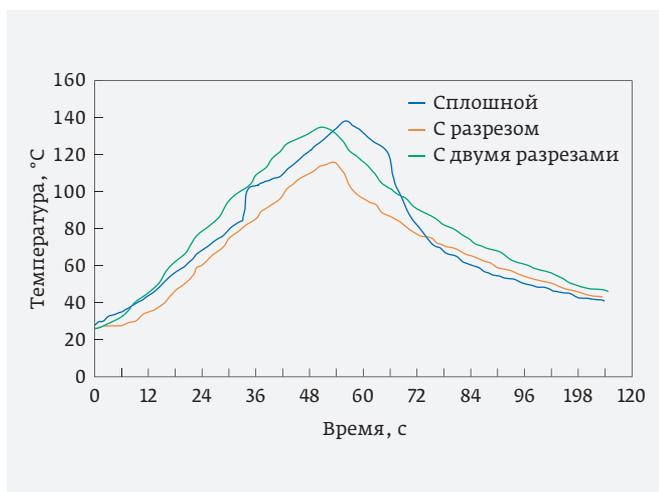


Рис. 10. Термопрофили печатной платы в процессе индукционной пайки



Рис. 11. Внешний вид сформированных шариков припоя на печатной плате

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен прототип устройства индукционной пайки с применением ZVS-генератора и кольцевого магнитопровода из феррита. Для повышения эффективности локального индукционного нагрева использованы концентраторы вихревых токов различной геометрической формы, изготовленные из материала с высокой электропроводностью. Данный метод обеспечивает локализацию мощности в зоне нагрева, обладает высоким коэффициентом полезного действия, экологически чист, может использоваться в инертных средах. Применение концентраторов увеличило равномерность нагрева шариков припоя. Время разогрева до температуры пайки с использованием концентратора с двумя разрезами составляет 26–30 с, скорость нагрева достигает 8 °С/с. При этом температура нагрева печатной платы находится в диапазоне 110–140 °С, что не приводит к ее перегреву.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Достанко А. П. [и др.]**. Контактно-барьерные структуры субмикронной электроники / Под ред. акад. НАН Беларуси А. П. Достанко и д-ра техн. наук В. Л. Ланина. Минск: Бест-принт, 2021. 270 с.
2. **Hongbo X., Mingyu L.** Lead-Free Soldering Technique by Using Medium-Frequency Electromagnetic Field // Proceeding 10th Electronics Packaging Technology Conference, 9–12 Dec., 2008. PP. 1351–1357.
3. **Новиков А. [и др.]**. Индукционная пайка электронных модулей с интегрированными susceptорными элементами // Технологии в электронной промышленности. 2021. № 5. С. 42–49.
4. **Колпаков А. [и др.]**. Основы силовой электроники: импульсные режимы работы // Силовая электроника. 2013. № 2. С. 46–52.
5. **Lanin V. L., Sergachov I. I.** Induction Devices for Assembly Soldering in Electronics // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2012. № 4. PP. 384–388.