

УДК 621.365.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ BGA И FLIP-CHIP МОНТАЖА



А.Д. Хацкевич

Магистр технических наук.
Инженер-электроник кафедры ЭТТ



В.Л. Ланин

Профессор кафедры электронной техники и
технологии, доктор технических наук

А.Д. Хацкевич

Магистр технических наук. Окончил аспирантуру на кафедре ЭТТ. Инженер-исследователь. Имеет более 20 публикаций по данной тематике.

В.Л. Ланин

Профессор кафедры электронной техники и технологии. Имеет 30-летний опыт работы в области технологии сборки и монтажа электронной аппаратуры. Автор 10 монографий в данной области.

Анотация. Моделирование процесса индукционного нагрева шариков припоя при монтаже электронных модулей с *BGA* и *Flip-Chip* выполнено в программном пакете *COMSOL Multiphysics*. Выявлены закономерности воздействия концентратора и магнитопровода на обрабатываемый образец. Получены тепловые профили нагрева при различных частотах индукционного нагрева.

Ключевые слова: индукционный нагрев, моделирование, *BGA*, *Flip-Chip*.

Введение. Тенденция к уменьшению размеров и веса изделий в современной электронике, особенно в области высокочастотных устройств связанных с быстрым развитием телекоммуникационных технологий и аэрокосмической техники, приводит к разработке новых технологий, включая «многоуровневые» многокристальные модули. Процесс сборки электронных модулей с применением технологий *2,5D* и *3D* требует не только использования сложного технологического оборудования, но также соответствующих материалов, включая припойные материалы с разной температурой плавления для соединения трехмерной конструкции [1].

Один из методов монтажа кристаллов на платы – это метод *Flip-Chip*, при котором кристалл микросхемы размещается на выводах, выполненных непосредственно на его контактных площадках, расположенных по всей поверхности кристалла микросхемы [2].

Оплавление шариков припоя конвекцией горячего воздуха или в инфракрасной печи может привести к их перегреву в течении длительного времени, а также вызвать коробление печатной платы.

Индукционный нагрев является наиболее перспективным методом нагрева, представляющим собой бесконтактный способ передачи электрической энергии через токи высокой частоты. Этот метод включает в себя нагрев материалов, способных проводить электрическую энергию, при помощи токов высокой частоты, индуцированных переменным магнитным полем, то есть нагрев изделий магнитным полем индуктора [3].

Индукционный нагрев в микроэлектронике предоставляет несколько преимуществ перед другими методами пайки:

1 Индукционный нагрев осуществляется без прямого контакта с нагреваемым объектом что исключает возможность механического повреждения чувствительных компонентов, таких как микрочипы.

2 Локальный и точный нагрев в необходимой области позволяет избежать повреждения окружающих компонентов и минимизировать влияние на соседние элементы.

3 Энергия передается непосредственно в нагреваемый материал посредством индукции, что обеспечивает высокую эффективность процесса. Это может быть особенно важно при работе с элементами, где необходимо минимизировать потери энергии.

4 Индукционный нагрев позволяет легко управлять температурой в процессе оплавления шариков припоя, что важно для предотвращения перегрева и повреждения чувствительных компонентов.

5 Обеспечивает высокую скорость нагрева, что важно в микроэлектронике, где требуется быстрое и точное соединение компонентов.

Для моделирования процесса индукционной пайки был выбран программный пакет *COMSOL Multiphysics* как инструмент для анализа, решения и моделирования методом конечных элементов в различных физических и инженерных приложениях [4].

Создание и задание параметров модели. В качестве физической модели был выбран модуль *Induction Heating* в состав которого входят модули *Magnet Fields* и *Heat Transfer in Solids*. По умолчанию подключается модуль *Electromagnetic Heating*. Он необходим при моделировании задач, связанных с электротермическим нагревом, таких как индукционный, лазерный или микроволновый нагрев. В нашем случае свойства материалов зависят от температуры, поэтому моделирование параметров электромагнитного поля будет меняться по мере нагрева системы. Геометрическая модель локального индукционного нагрева представлена на рисунке 1.

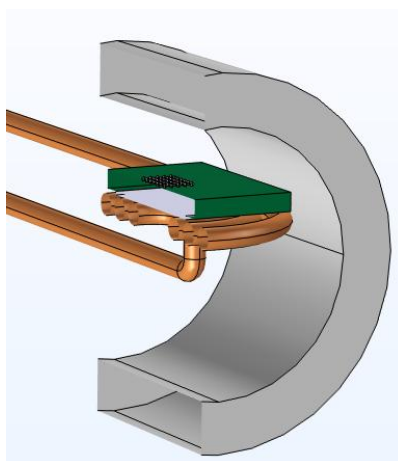


Рисунок 1. Модель локального индукционного нагрева

Параметры компонентов геометрической модели индукционного нагрева представлены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические параметры компонентов

Геометрические размеры платы	25x25x2.54 мм
Геометрические размеры концентратора	20x20x3 мм
Диаметр трубки индуктора	3 мм
Размер шариков припоя	0.760 мм

Для повышения эффективности индукционного нагрева в качестве концентратора выбран медная пластина с симметричным паттерном прямоугольных окон, которые необходимы для предотвращения перегрева печатной платы, как происходит в случае использования концентратора без отверстий. Внешний вид концентратора представлен на рисунке 2.

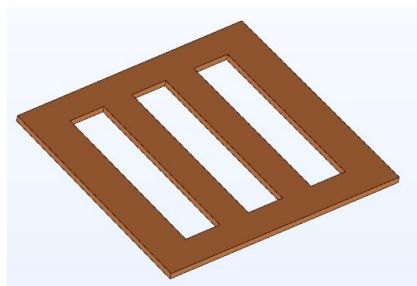


Рисунок 2. Внешний вид концентратора

Материалы и их свойства, использованные в модели, взяты из стандартной библиотеки материалов *COMSOL* и представлены в таблице 2. В качестве шариков припоя выбран бессвинцовый припой, что соответствует современным экологическим стандартам в электронике.

Таблица 2. Материалы модели

Шарики припоя	$Sn-3.5 Ag-0.5 Cu$
Материал индуктора	медь
Материал концентратора	медь
Материал печатной платы	FR-4
Магнитопровод	Феррит с магнитной проницаемостью 2500

Построение сетки представляет собой важный этап в моделировании, так как он напрямую определяет затраты вычислительных ресурсов при расчете. Более того, создание сетки – один из наиболее ресурсоёмких этапов при настройке и расчёте модели методом конечных элементов. *COMSOL Multiphysics* предоставляет возможность настройки сетки как в автоматическом, так и в ручном режимах. Однако, в контексте данной задачи, автоматический режим не является подходящим, поскольку из-за маленького размера шариков припоя, сетка становится неоптимальной. Вместо этого, мы используем размер сетки *Extra Fine* для шариков припоя, а для остальных элементов применяем сетку большего размера. Это позволяет оптимизировать модель и значительно сократить время её расчёта. Внешний вид настроенной сетки в модели локального индукционного нагрева представлен на рисунке 3.

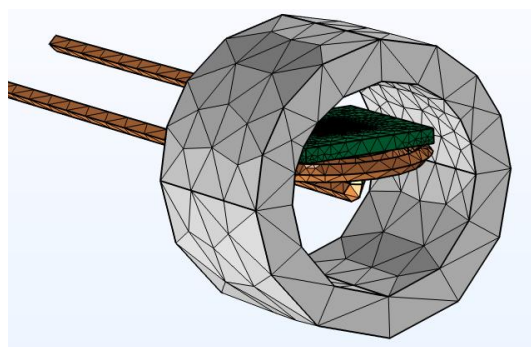


Рисунок 3. Настроенная сетка модели локального индукционного нагрева

Выбор решателя. *Coil Geometry Analysis* в *COMSOL* используется для расчета тока в функции *Coil* в 3D-моделях.

Этот анализ используется для определения локального направления тока в области, учитывая входные и выходные границы катушки (или внутреннюю границу в случае катушек замкнутого типа). Это особенно полезно, когда модель катушки зависит от выбранной модели проводника. Условия границ для анализа геометрии указываются с помощью подузлов ввода и вывода, доступных с узлом. Это обеспечивает более точное и эффективное моделирование электромагнитных систем.

Для расчета в частотной и временной области используется *Frequency Domain* и *Time Dependent* соответственно. Решатели в интерфейсе программы представлены на рисунке 4.

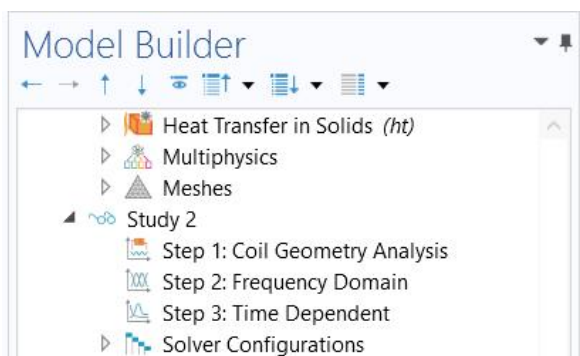


Рисунок 4. Последовательность решателей в узле *Study*

Температурные поля платы на выводах в виде шариков припоя, выполненных на контактных площадках платы представлены на рисунке 5.

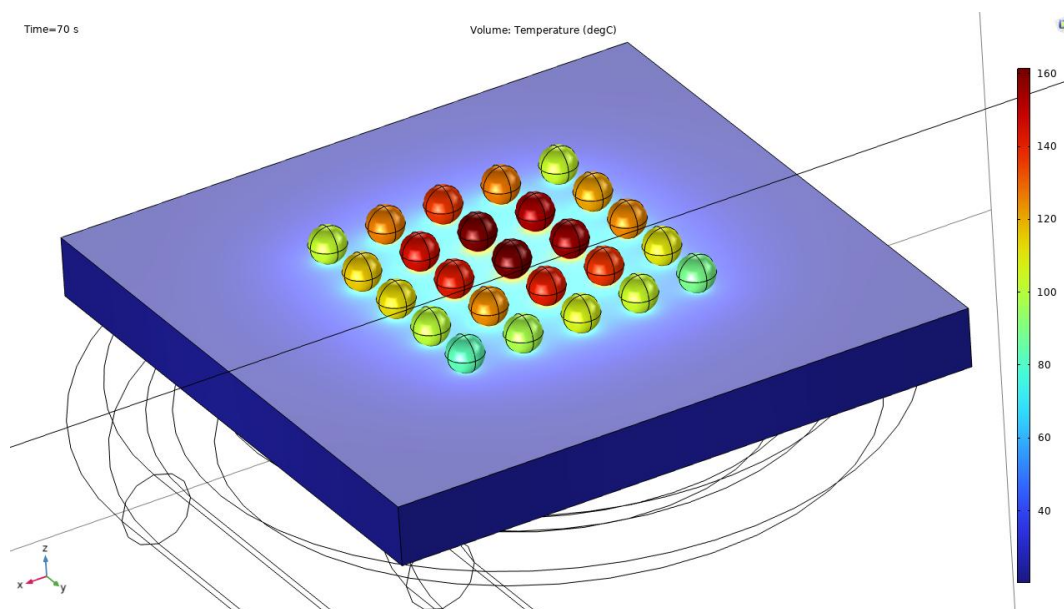


Рисунок 5. Температурные поля в шариках припоя

По равномерности поля можно сделать вывод, что на равномерность нагрева шариков припоя влияет геометрическая форма индуктора. Краевые шарики нагреваются слабее на 10 - 15 °C в следствии краевого эффекта.

Термопрофили локального индукционного нагрева на различных частотах без концентратора и магнитопровода представлен на рисунке 6.

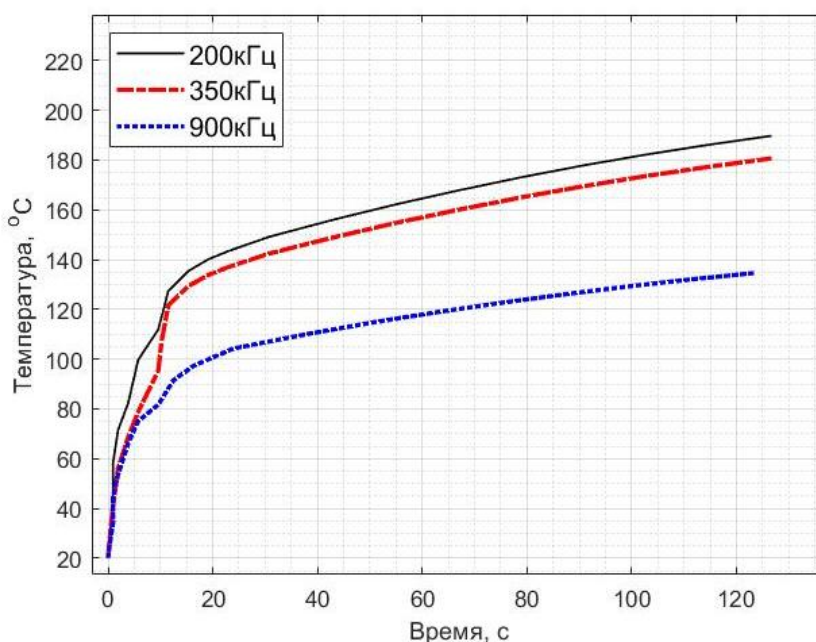


Рисунок 6. Термопрофили локального индукционного нагрева на различных частотах без концентратора и магнитопровода

Температура нагрева шариков припоя без концентратора и магнитопровода не достигает необходимых значений для пайки бессвинцовых шариков припоя на всех частотах индукционного нагрева.

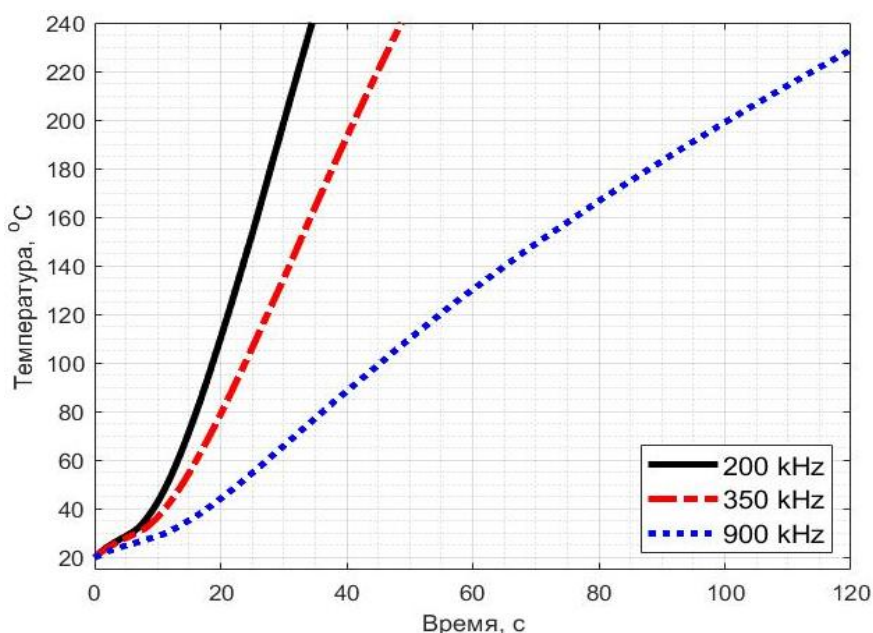


Рисунок 7. Термопрофили локального индукционного нагрева на различных частотах с концентратором и магнитопроводом

Анализируя графики на рисунке 7, можно заметить, что применение концентратора и магнитопровода увеличило скорость нагрева: для частоты 200 кГц она составила 7–8°C/с, для 350 кГц – 4–5°C/с, для 900 кГц – 2–3°C/с.

Использование частот меньше 200 кГц не рекомендуется, поскольку это может привести к перегреву медного концентратора, что, в свою очередь, может вызвать перегрев и последующее разрушение печатной платы. В связи с этим, для данной конфигурации паяемого образца и мощности нагрева (30 Вт), рабочий диапазон частот следует выбирать в пределах 400 кГц – 1 МГц.

Заключение. Процесс индукционного нагрева оптимизирован с помощью программы *COMSOL Multiphysics*. Показано, что применение медного концентратора и ферритового магнитопровода повышает эффективность нагрева до 5 раз. Однако частота индуктора существенно влияет на температуру паяемого образца. В данном случае частота 200 кГц приводит к чрезмерно быстрому нагреву шариковых выводов, что негативно сказывается на качестве такого соединения. В данной модели при мощности индукционной системы в 30 Вт рабочий диапазон частот следует выбирать в пределах 400 кГц – 1 МГц.

Список литературы

- [1] Технологии и оборудование субмикронной электроники / А.П. Достанко [и др.]; под общ. ред. акад. А.П. Достанко. – Минск: Беларуская навука, 2020.–260с.
- [2] Flip chip – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://semiengineering.com/knowledge_centers/packaging/flip-chip/. – Дата доступа: 23.01.2024.
- [3] Индукционный нагрев – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.элсит.рф/вики/термообработка>. – Дата доступа: 10.04.2023.
- [4] COMSOL Multiphysics – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics>. – Дата доступа: 10.04.2023.

Авторский вклад

Авторы внесли равноценный вклад в написании статьи

SIMULATION OF LOCAL INDUCTION HEATING FOR BGA AND FLIP-CHIP ASSEMBLY

A.D. Khatskevich

Master of Engineering.

PhD applicant. *Electronic Engineer of the Department of ETT*

V.L. Lanin

Professor, Department of Electronic System and Technology, Doctor of Sciences

Abstract. The process of induction heating of solder balls using simulation in the COMSOL Multiphysics software package has been investigated. The patterns of the concentrator and magnetic circuit's impact on the processed sample have been identified. Heat profiles of heating at various inductor frequencies have been obtained.

Keywords: induction heating, simulation, BGA, Flip-Chip.