

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.94:621.3.049.75-046.46

Войналович
Александр Андреевич

**ТЕХНОЛОГИЯ МОНТАЖА 3D ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ С
ПРИМЕНЕНИЕМ ЛОКАЛЬНОГО ИНДУКЦИОННОГО
НАГРЕВА**

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-39 80 03 «Электронные системы и технологии
(Интегрированные технологии производства электронных систем)»

Научный руководитель

Ланин Владимир Леонидович

доктор технических наук, профессор

Минск 2023

ВВЕДЕНИЕ

Производство 3D модулей в электронной промышленности считается революционной технологией и производственным инструментом нового поколения. Технология позволяет уменьшить размеры исходного продукта, увеличить прочность. Прогресс в технологии изделий электроники достигается совершенствованием оборудования, используемых материалов, а также разработкой новых, эффективных технологических процессов.

Производство 3D модулей предполагает использование шариков припоя, потому что с развитием электроники растёт количество выводов компонентов. Для формирования шариков припоя требуется выбрать оптимальный вариант нагрева. Перспективным является применение методов бесконтактного нагрева, основанных на использовании электромагнитного излучения. Одним из таких методов является лазерный нагрев. Отличительная особенность данного процесса – локальность теплового воздействия, высокая стабильность температурно-временных режимов, гибкое регулирование подводимой тепловой энергии, отсутствие контакта с шариками припоя, высокая производительность процесса.

При сборке 3D структур эффективны высокочастотные инверторы способные локализовать нагрев и с высокой точностью поддерживать температуру нагрева, что особенно важно при соблюдении термопрофилей пайки электронных компонентов.

Для уменьшения трудоёмкости и повышения энергоэффективности предлагается использовать высокочастотный локальный индукционный нагрев. Индукционный метод нагрева переменным электромагнитным полем давно и успешно применяется в промышленности. Воздействие энергии высокочастотных электромагнитных колебаний позволяет осуществлять высокопроизводительный локальный и бесконтактный нагрев в различных технологических процессах обработки проводящих материалов: термообработке, плавке, упрочнении, сварке, пайке, выращивании кристаллов и т. д.

Скорость нагрева может быть увеличена до 10 раз по сравнению с конвективными источниками, зона нагрева локализуется в пределах участка, определяемого конструкцией индуктора. Высокая скорость нагрева токами ВЧ достигается соответствующим выбором частоты тока.

С переходом на бессвинцовую технологию ключевым требованием к паяльному оборудованию становится стабильность термоуправления, то есть сохранение точности поддержания температуры в течение всего процесса пайки электронных компонентов. Связано это требование с тем, что температура пайки повысилась на 40 градусов и стала близка к предельно допустимой для компонентов температуре. Снижение точности термического профиля нагрева увеличивает риск теплового повреждения компонентов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными исследованиями университета. Результаты диссертационного исследования получены в рамках проведения следующих научно-исследовательских работ: Задание 3.1.04 «Технологические системы и процессы модификации поверхностей при формировании планарных и 3D структур электронной техники» НИР № 2 «Формирование микро- и нано-структурированных контактных соединений в высокоскоростных 3D электронных устройствах» подпрограммы «Электромагнитные, пучково-плазменные и литейно-деформационные технологии обработки и создания материалов» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021-2025 годы, № ГР 20212319, а также ГБ 2021-26 Физико-химические процессы формирования твердотельных структур электронной, электронно-оптической и медицинской техники «ЧАСТЬ 1 Материалы и процессы формирования твердотельных структур электронной техники» 2021-2023 г.

Цель исследования. Моделирование тепловых полей и оптимизация параметров локального индукционного нагрева шариков припоя, разработка технологии Flip-Chip монтажа кристаллов интегральных схем при создании 3D модулей.

Задачи исследования.

1. Анализ технологий и оборудования высокочастотного индукционного нагрева.
2. Разработка методики компьютерного моделирования процесса высокочастотного индукционного нагрева шариков припоя при сборке 3D модулей.
3. Моделирование и оптимизация технологии монтажа 3D электронных модулей с применением индукционного нагрева.
4. Экспериментальное исследование режимов высокочастотного индукционного нагрева для монтажа 3D электронных модулей.
5. Разработка практических рекомендаций по внедрению технологии высокочастотного индукционного нагрева при сборке 3D модулей.

Объект исследования – припойные выводы в 3D модулях для Flip-Chip монтажа кристаллов.

Предмет исследования – процессы и оборудование высокочастотного локального индукционного нагрева.

Новизна полученных результатов.

– разработана методика компьютерного моделирования локального индукционного нагрева тепловых полей шариков припоя в диапазоне частот от 600 кГц до 1000 кГц с различными вариантами размещения платы с шариками припоя в зазоре магнитопровода и внутри цельного магнитопровода с использованием различных типов концентраторов вихревых токов;

– разработана методика локального индукционного нагрева шариков припоя, включающая применение кольцевого индуктора, ферритового

магнитопровода, медных концентраторов различной формы, расположенных под платой, которая позволила при скорости нагрева в 2,9–3,5 °С/с обеспечить воспроизводимость высоты шариков припоя на контактных площадках платы на уровне 95 %;

– установлены закономерности формирования массива шариков припоя из паяльной пасты на контактных площадках платы для Flip-Chip монтажа локальным индукционным нагревом мощностью 28–30 Вт в диапазоне частот 700 – 800 кГц.

Положения, выносимые на защиту.

1. Компьютерная модель распределения тепловых полей в зоне локального индукционного нагрева шариков припоя в Comsol Multiphysics на основании которой оптимизирован режим работы ZVS-генератора с диапазоне частот 700 –800 кГц, при токе индуктора в 4–6 А и использовании концентратора оптимальной формы, при котором формируются однородные по размерам шарик припоя и не перегревается плата.

2. Методика локализации индукционного нагрева шариков припоя, включающая применение кольцевого индуктора, ферритового магнитопровода, медных концентраторов различной формы с проводящими элементами, расположенными симметрично рядом шариков припоя, находящихся на контактных площадках печатной платы, и формирующих замкнутый контур, которая позволила за счет поверхностного эффекта добиться скорости нагрева в 3,05–5,5 °С/с.

3. Закономерности увеличения прочности соединения шариков припоя с контактными площадками платы от 10 до 20 Н при мощности в диапазоне 28–30 Вт и диапазоне частот задающего генератора 700-800 кГц при общей погрешности высоты шариков в 3,6% после индукционной пайки.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований, включённые в магистерскую диссертацию, были опубликованы на 58-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 18-22 апреля 2022г.), 18-ой Юбилейной международной молодёжной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ-2022» (Севастополь, Российская Федерация, 10-14 октября 2022 г.), научной конференции BIG DATA 2022 г, 59-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 17-21 апреля 2023 г.).

Опубликованность результатов исследования.

По материалам диссертации опубликовано 4 работы, в том числе 4 доклада в материалах научных конференций.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, одного приложения. Работа изложена на 45 страницах, включающая 50 рисунков, 4 таблиц, список литературы из 16 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены анализы методов и устройств воздействия концентрированными потоками электромагнитной энергии для сборки и монтажа электронных модулей 3D электронных модулей. Показано, что 3D-модуль (далее 3DM) представляет собой систему, состоящую из двух или более микросхем, расположенных вертикально в стек на одной подложке, каждая из которых предназначена для выполнения своей функции. Конструкция 3DM обеспечивает электрические межсоединения микросхем, содержащихся в модуле, с наружными выводами, теплоотвод (активное, пассивное охлаждение) и защиту от окружающей среды.

По сравнению с однокристалльными микросхемами, объединенными в систему, и другими многокристалльными системами 3DM имеют ряд преимуществ: меньшие размеры, поскольку микросхемы в модуле можно разместить близко одна к другой, а также использовать вертикальное направление (в системах с однокристалльными микросхемами большое неиспользуемое пространство корпусов); улучшенные электрические характеристики благодаря более коротким расстояниям между кристаллами микросхем и, следовательно, меньшей длине межсоединений; выше надежность из-за меньшего количества межсоединений.

В больших объемах 3DM также позволяют снизить расходы благодаря меньшему числу компонентов сборки. Освоение технологии сборки 3DM – необходимый шаг на пути создания перспективных типов многофункциональных электронных устройств.

Рассмотрены методы локального воздействия энергии для процессов формирования контактных соединений пайкой такие как высокочастотный нагрев, нагрев инфракрасным и лазерным излучением. Выявлены преимущества и недостатки вышеизложенных методов локального воздействия для формирования контактных соединений.

Выполнен обзор устройств индукционного нагрева для формирования контактных соединений в электронных модулях. Благодаря таким качествам ВЧ индукционного нагрева, как локальность, простота конструкции, высокая экологическая чистота, создание вихревых токов, возможность использования электродинамических сил для улучшения растекания припоя и перемешивания расплава металла, данный тип воздействия концентрированных потоков электромагнитной энергии лучше всего подходит для поверхностного монтажа электронных модулей. С помощью индукционных устройств можно осуществлять пайку силовых контактов, разъемов и проводов на печатные платы, герметизацию металлостеклянных корпусов интегральных схем.

Во второй главе проведено моделирование технологических систем для формирования контактных соединений высокой плотности в 3D электронных модулях. В качестве модели выбран метод конечных элементов, который обладает высокой скоростью вычислений, может быть применен к телам состоящих из нескольких материалов и сложной геометрией. Моделирование параметров индукционной системы произведено в пакете Comsol Multiphysics -

в интерактивной среде для моделирования и решения широкого класса научных и инженерных задач, которые можно сформулировать в виде системы дифференциальных уравнений.

В исследовании использован мультифизический интерфейс Induction Heating. В качестве модели исследования был выбран Frequency Stationary в котором реализуется следующая логика расчета: магнитная задача решается в частотной области.

В третьей главе разработана методика исследования индукционного нагрева при формировании контактных соединений в 3D электронных модулях. Приведён расчёт для оптимального диапазона частот 700-800 кГц, устанавливаемый на задающем генераторе.

Для исследования термопрофилей пайки индукционного нагрева применён блок микроконтроллерного управления термопрофилем на основе процессора Raspberry Pi, передающий данные на персональный компьютер. В качестве измерителя температуры в прототипе используется термопара.

В четвёртой главе приведены исследования локального индукционного нагрева при формировании контактных соединений высокой плотности в 3D электронных модулях. Анализ зависимостей температуры шариков припоя с течением времени свидетельствует о скорости нагрева 2,9-3,5 °C/с вне зависимости от типа применённого концентратора. Скорость охлаждения составляет 2-3 °C/с при применении концентраторов с разрезами, 1,2-2 °C/с при использовании сплошного концентратора, не имеющего разреза.

Проверку качества, а также контроль высоты, сформированных шариков припоя проводили на микроскопе Carton NSWТ-620.PFM-X. После проведения локальной индукционной пайки погрешность расхождения высоты шариков находятся в пределах 3-6%, что свидетельствует о равномерном процессе нагрева.

С повышением частоты происходит вытеснение вихревых токов к поверхности шарика припоя и увеличения значения плотности тока в поверхностном слое.

В пятой главе даны практические рекомендации по исследованию нагрева. Также даны рекомендации по улучшению конструкции инвертора. В конструкции инвертора следует применять более быстродействующих ключей в выходных каскадах инвертора. Контроль за экстремальными режимами работы силового блока во избежание выхода из строя дорогостоящих элементов. Использовать систему охлаждения с вакуумным насосом для предотвращения перегрева в индукторной катушке. В согласующем трансформаторе рекомендуется применять многопроволочную обмотку типа литцендрат для увеличения добротности. Также необходимо уменьшить паразитные емкости и индуктивности в силовом блоке. Для этого, проводники по которым текут коммутируемые токи, необходимо делать как можно короче, прямее и толще. Не допускать пересечения или переплетения таких проводников. В качестве оборудования для измерения температуры рекомендуется использовать прецизионные бесконтактные сенсоры, которые должны быть настроены для работы с отражающими поверхностями для

увеличения точности измерения в зоне нагрева.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа литературных источников и, используя поиск материалов по данной теме в сети интернета, определена перспективность процессов локальной индукционной пайки. Воздействие энергии высокочастотных (ВЧ) электромагнитных колебаний позволяет осуществлять высокопроизводительный бесконтактный нагрев в различных процессах обработки проводящих материалов: термообработке, плавке, упрочнении, сварке, пайке, выращивании кристаллов и т. д. Наиболее важными преимуществами ВЧ-нагрева являются следующие:

- энергия нагрева создается вихревыми токами непосредственно в изделии;
- возможны высокая плотность энергии и короткое время нагрева;
- локализация нагрева в пределах обрабатываемой зоны;
- возможность нагрева в любой среде, включая вакуум или инертный газ;
- высокая экологическая чистота нагрева;
- возможность использования электродинамических сил для улучшения растекания припоя, перемешивания расплава металла и т. д.

При оптимизации параметров процесса индукционного нагрева важным моментом является нахождение наиболее эффективных режимов работы установки таких, как установка требуемой частоты и изменение мощности. Поскольку это сложный экспериментальный процесс, применение компьютерного моделирования повышает эффективность исследований.

2. Результаты моделирования локального индукционного нагрева в пакете COMSOL Multiphysics показали, что проявляется краевой эффект, который свидетельствует о неравномерном нагреве печатной платы: нагрев по краям печатной платы осуществляется более интенсивно, чем в центре. Добавление концентратора, расположенного под печатной платой, в моделируемую систему позволяет локализовать индукционный нагрев, минимизировать краевой эффект, равномерно распределив температуру по печатной плате, и увеличит скорость нагрева. Разработана методика компьютерного моделирования локального индукционного нагрева тепловых полей шариков припоя в диапазоне частот от 600 кГц до 1000 кГц с различными вариантами размещения платы с шариками припоя в зазоре магнитопровода и внутри цельного магнитопровода с использованием различных типов концентраторов вихревых токов.

3. Разработанная методика локального индукционного нагрева шариков припоя, включающая применение кольцевого индуктора, ферритового магнитопровода, медных концентраторов различной формы, расположенных под платой, которая позволила с большой точностью установить скорость нагрева в 2,9–3,5 °C/с и, соответственно, зафиксировать термопрофиль.

4. Разработана методика локального индукционного нагрева шариков припоя, включающая применение кольцевого индуктора, ферритового магнитопровода, медных концентраторов различной формы, расположенных

под платой, которая позволила при скорости нагрева в 2,9–3,5 °С/с обеспечить воспроизводимость высоты шариков припоя на контактных площадках платы на уровне 94 %. Экспериментально установлено, что время и скорость проведения процесса локальной индукционной пайки зависят не только от начальных параметров системы таких, как сила тока индуктора и частота задающего генератора, но и от типа применяемого концентратора. Получены термопрофили локального индукционного нагрева печатной платы с шариками припоя в диапазоне 200-210 °С в кольцевом магнитопроводе. Применение концентраторов с прорезями не так сильно нагревают плату, о чём свидетельствует бóльшая скорость охлаждения 2-3 °С/с, чем у сплошного концентратора 1,2-2 °С/с. Оптимальная прочность соединения шариков припоя с контактными площадками достигается при мощности генератора равной 28 Вт.

5. При проведении локальной индукционной пайки рекомендуется использовать дополнительное охлаждение для сохранения магнитных свойств магнитопровода, а также необходимо применение концентраторов с проводящими элементами, расположенными симметрично рядам шариков припоя, для равномерного нагрева печатной платы. Приведено описание и структурная схема ZVS генератора, применённого при проведении локальной индукционной пайки. Даны рекомендации по использованию оборудования на срез с более удобным фиксатором изделия и точным датчиком, снимающим результаты измерений.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Войналович, А. А. Моделирование тепловых полей индукционного нагрева при формировании шариков припоя на печатных платах / А. А. Войналович // Электронные системы и технологии [Электронный ресурс] : сборник материалов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 18-22 апреля 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]. – Минск, 2022. – С. 361–363. – Режим доступа: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/46926>.

2. Хацкевич, А.Д. Моделирование тепловых полей при формировании шариков припоя индукционного нагрева / А.Д. Хацкевич, В.Л. Ланин, А. А. Войналович // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «BIG DATA and Advanced Analytics. BIG DATA и анализ высокого уровня», Минск, Республика Беларусь, 11-12 мая 2022 год – С. 157–162.

3. Войналович, А.А. Моделирование тепловых полей индукционного нагрева в шариках припоя при сборке 3D-модулей по технологии FLIP-CHIP / А. А. Войналович // Материалы 18-ой международной молодёжной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций», 10 —14 октября 2022 г., Севастополь: Изд-во СевГУ, 2022 – С. 122.

4. Войналович, А. А. Формирование шариков припоя на печатных платах для FLIP-CHIP / А. А. Войналович // Электронные системы и технологии [Электронный ресурс]: сборник материалов 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 17-21 апреля 2023 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]. – Минск, 2023. – В печати.