

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
УДК 621.373.826

Фам  
Ван Тунг

Технология формирования шариковых выводов припоя с использованием  
лазерного нагрева при сборке 3D электронных модулей

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-39 80 03  
Электронные системы и технологии

Научный руководитель  
Ланин Владимир Леонидович  
Профессор, д.т.н. кафедры ЭТТ

Минск 2021

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с постоянным стремлением микроэлектронной промышленности к миниатюризации и повышению производительности, плотность подсчета входных/выходных сигналов на электронных блоках многократно увеличивается в пределах данной области. Традиционный процесс крепления шариков припоя на основе флюса быстро достигает своего узкого места в удовлетворении более строгих допусков по шагу и проблемах сборки в корпусах оптоэлектроники и микроэлектромеханических систем. Чтобы удовлетворить новые требования к упаковке, была разработана новая технология безфлюсовой лазерной наплавки шариков припоя. Процесс лазерного формирования микровыводов был внедрен в промышленность для практического использования из-за его низкой стоимости и уникальных свойств, таких как локализованный и бесконтактный нагрев, быстрое повышение и понижение температуры, а также простота автоматизации по сравнению с процессом пайки оплавлением.

Традиционная технология формирования микровыводов припоя широко используется в процессе прикрепления шариков припоя на основе флюса для создания паяных выступов и межсоединений для корпусов микроэлектроники. Перед процессом оплавления на металлические контактные площадки был нанесен липкий флюс, чтобы удерживать шарики припоя после первоначального размещения. Кроме того, липкий флюс служил для удаления слоя оксидов на поверхности металлических контактных площадок и способствовал смачиванию припоя во время процесса оплавления. Шарик припоя и металлическая контактная площадка вступили в химическую реакцию, образуя очень тонкий непрерывный слой интерметаллических соединений на границе соединения.

В индустрии микроэлектроники предварительно сформированный шарик припоя обычно используется для пайки и обеспечения паяных соединений в электронных корпусах. Паяные соединения служат для электрического соединения корпуса и добавляют механической прочности всей сборке. Несмотря на то, что шарик припоя может иметь широкий спектр сплавов и диаметров до 40 мкм, он обеспечивает большую гибкость и совместимость с различными типами материалов контактных площадок и требованиями к шагу. В связи с постоянным стремлением к миниатюризации устройств и появлению новых приложений в портативной электронике, такой как мобильные телефоны, ноутбуки, портативные электронные устройства, автомобильные сенсорные чипы и многие другие, надежность паяных соединений против механизма отказа стала критической проблемой.

Матричную структуру шариковых выводов формируют, используя паяльную пасту и трафаретную печать. Этот метод отличается высокой производительностью и снижением расходов на формирование выводов.

Лазерное формирование микровыводов из шариков припоя реализует следующие преимущества:

- возможность фокусировки в пятно очень малого диаметра;
- бесконтактная обработка и отсутствие изнашивающихся инструментов;
- возможность подбора параметров, позволяющих обеспечить нужную геометрию отверстий;
- управление пространственным положением шариков припоя;
- небольшая зона прогрева.

Лазерное формирование припойных микровыводов является бесконтактным процессом, исключающим внесение загрязнений в полученное соединение. Паяные соединения, выполненные лазерной пайкой, имеют глянцевую поверхность, хорошо сформированные галтели, отличаются повышенными прочностными свойствами. Возможность гибкого регулирования и точного дозирования подводимой энергии позволяет варьировать температуру и время пайки в широких пределах.

Основным фактором, обеспечивающий качество шарика при лазерном нагреве, является правильный выбор параметров процесса. Применение компьютерного моделирования позволяет осуществить предварительный расчет параметров нагрева, вычислить диапазон приемлемых параметров, откуда процесс лазерного формирования микровыводов припоя оптимизировался.

Задача магистерской диссертации является анализ методов и оборудования для лазерного формирования шариковых выводов припоя при сборке 3D электронных модулей; построение компьютерной модели тепловых полей на шарике припоя под действием лазерного излучения для оптимизации параметров лазерного излучения, разработка методики исследования технологии лазерного формирования шариковых выводов припоя, обеспечение практические рекомендации по использованию результатов данного исследования.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами**

Тема диссертационной работы утверждена Советом учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Диссертационная работа выполнялась на кафедре «Электронной техники и технологии» в рамках следующей научной программы: ГБ № 16-2020 «Материалы, технологические процессы и устройства электронно-оптических систем, электронных средств, биомедицинской и интегральной электроники».

### **Актуальность темы исследования**

Электронная промышленность заинтересована в создании устройств малых размеров с высокой степенью интеграции, широким набором функций и доступных по стоимости. Эффективное решение этой задачи возможно с использованием 3D электронных модулей. 3D-модуль представляет собой систему, состоящую из двух или более микросхем, расположенных вертикально в стек на одной подложке, каждая из которых предназначена для выполнения своей функции. Лазерное формирование микровыводов из шариков припоя – один из перспективных методов создания выводов для межсоединения 3D электронных модулей с соответствующим технологическим требованиям уровнем качества. Лазерная технология находит широкое применение в наукоемких отраслях производства, в серийном производстве новых видов продукции поскольку обеспечивает возможность нагрева локализацией мощности и малые зоны термического влияния.

### **Цель и задачи исследования**

Целью магистерской диссертации является исследование особенностей технологии лазерного формирования микровыводов из шариков припоя, построение компьютерного моделирования процесса формирования микровыводов с использованием лазерного излучения следует оптимизации параметров лазерного излучения для применения в промышленности.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ технологии и лазерного оборудования формирования шариковых микровыводов припоя.
2. Построение компьютерных моделей и оптимизация технологических параметров лазерного излучения.
3. Разработка методики и исследование технологических процесса лазерного формирования микровыводов из шариков припоя при сборке 3D

электронных модулей, контроля геометрической формы, прочности соединений шариков с контактной площадкой.

4. Разработка практических рекомендаций по использованию результатов исследований.

**Объектом** исследования является 3D электронные модули, шарики бессвинцового припоя.

**Предметом** исследования являются процессы лазерного формирования микровыводов из шариков припоя при сборке 3D электронных модулей.

**Область исследования** содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-39 80 03 «Электронные системы и технологии».

**Информационная база** исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

**Научная новизна** полученных результатов обусловлена моделированием импульсного лазерного излучения и диаметра шариков припоя при формировании микровыводов в пакете COMSOL Multiphysics, определением размеров сформированных микровыводов и закономерностей процесса лазерного формирования микровыводов из шариковых припоев (зависимости времени нагрева от интенсивности лазерного луча, диаметра и высоты полученных выводов при использовании шариков другими размерами и составами, их зависимость от энергии импульсного излучения).

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту**

1. Модели тепловых полей на поверхности шариков припоя при воздействии излучения твердотельного лазера в среде COMSOL Multiphysics, включающие математическая выражения, связывающие размеры и физические свойства лазерного излучения и шариков припоя, что позволило получить оптимальные режимы формирования микровыводов из шариков припоя диаметром 40-760 мкм под воздействием лазерного излучения в импульсном режиме длиной волны 1064 нм и 532 нм, длительностью от 5-150 мс с диаметром пятна излучения от 20 мкм до 2 мм.

2. Методика исследования процесса лазерного формирования микровыводов припоя лазерным излучением, включающая компьютерное управление мощностью лазерного излучения от 20 мВт до 35 Вт, системой фокусировки излучения для управления малым диаметром до 40 мкм, контроль термопрофиля процесса формирования шариковых выводов припоя в диапазоне

200–250 °С, прочности присоединения и оценку равномерности микровыводов припоя с помощью цифрового микроскопа.

3. Экспериментально установленные параметры лазерного излучения для получения микровыводов из шариков припоя размерами 200-1000 мкм, включающая оценку равномерности микровыводов припоя с помощью цифрового микроскопа, оценку прочности соединений бампов диаметром 80 мкм, находящейся в диапазоне 0,21-0,25 Гс, сформированных на установке ЭМ-4452 на основе полученных значений из моделирования и методики исследования.

**Теоретическая значимость** работы заключается в моделировании и оптимизации технологических режимов процесса лазерного формирования микровыводов из шариков припоя, установление зависимостей характеристик выводов (высота, диаметра, сила сдвига), времени нагрева от параметров лазерного излучения.

**Практическая значимость** – разработана технология получения микровыводов из шариков припоя с использованием лазерного излучения.

**Апробация диссертации и информации об использовании ее результатов**

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 55-й, 56-й и 57-й научных конференциях студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР 2019–2021, 6-й международной конференции «BIGDATA» 2020, 15-й и 16-й международных молодежных научно-технических конференциях «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» 2019 и 2020 в Севастополе, VI Белорусско-китайском молодежном инновационном форуме «Новые горизонты 2019», 13-й международной научно-технической конференция «Приборостроение — 2020».

#### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 11 печатных работ, 3 статья в периодических научных журналах, в том числе 2 статьи, включенные в Перечень ВАК Республики Беларусь, 8 докладов в материалах научных конференций.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка цитируемой литературы из 73 наименований. Общий объем диссертации 86 страницы, в том числе 45 иллюстраций и 12 таблиц.

Во Введении приводится обоснование актуальности работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приводятся тенденции создания 3D сборок, изготовление микросхем с минимальными размерами элементов с помощью 2,5D и 3D технологий, технология формирования микровыводов и особенно технология лазерной обработки. Дается обзор современных технологических лазерных установок.

Вторая глава посвящена разработке методики моделирования тепловых полей на шариках припоя при воздействии лазерного излучения, создание физических моделей в программном пакете COMSOL Multiphysics. Определены зависимости температуры шарика припоя от времени нагрева при использовании различных режимов лазерного излучения. Определены оптимальные параметры лазерного нагрева.

Третья глава содержит методики лазерного формирования микровыводов из шариков припоя, исследование тепловые поля с помощью инструментов (термопары, пирометра и тепловизор). Методика исследования термопрофиля процесса формирования шариковых выводов припоя с использованием лазерного нагрева включает в себя использование термометры сопротивления, термоэлектрические преобразователи. Рассмотрен метод контроля прочности соединений с контактной площадкой микровыводов из шариков припоя, на основе испытания на сдвиг этих выводов.

В четвертой главе диссертации представлены:

- исследования диаметра и высоты микровыводов из шариков припоя, полученных методом лазерного нагрева на установке ЭМ-4452;
- зависимости сила сдвига сформированных микровыводов от их положений на контактной площадке платы.
- Дефекты на поверхностях микровыводов.

Пятая глава даёт практические рекомендаций по использованию результатов исследования. Даны рекомендации, касающиеся используемого оборудования для исследования лазерного формирования микровыводов и механизм подачи шариков припоя.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены особенности 3D электронных модулей и технологии их производства и преимущества технологии лазерного формирования микровыводов из шариков бессвинцовых припоев. Лазерное формирование припойных микровыводов является бесконтактным процессом, исключающим внесение загрязнений в полученное соединение. Процесс оптимизации параметров включает в себе нахождение наибольших эффективных режимов работы лазера, как длина волны излучения, мощность лазерного источника, длительность воздействия, а также оборудования и комплекты инструментов для каждой операции работы.

2. Выполнено моделирование процесса лазерного формирования шариковых выводов припоя. Получены зависимости температуры нагрева и тепловые зоны нагрева шариков припоя диаметром 760 мкм от времени длины волны лазера. Установлено, что лазерное излучение длиной волны 532 нм позволяет достигать температуры плавления припоя быстрее в 2 раза чем лазер длиной волны 1064 нм. Шарик диаметром 760 мкм расплавлен под действием излучения мощностью 37 Вт и длительности 150 мс, а шарик 40 мкм – 100 мВт и 0,5 мс. Уменьшение диаметр лазерного пятна приводит к необходимости повышения времени воздействия излучения и растет температура нагрева в зоне обработки ввиду большей концентрации источника тепла. Из результатов моделирования определены оптимальные значения лазерного нагрева шариков припоя.

3. Разработана методика исследования технологии формирования шариковых выводов припоя с использованием лазерного нагрева. Использование импульсов лазерного излучения длительностью до 150 мс позволяет обрабатывать микровыводы в хрупких материалах без их растрескивания, что обусловлено более равномерным распределением остаточных напряжений по толщине материала. При контроле прочности соединений с контактной площадкой микровыводов из шариков припоя требуется учитывать физические характеристики материалов, из которых изготовлены шарики припоя и контактные площадки и внутри металлизации между ними. При проверке геометрической формы этих микровыводов необходимо использовать инструменты с высокой точностью в соответствии с критерием о качестве электронных сборок.

4. Выполнено экспериментальное исследование процесса формирования шариковых выводов припоя лазерным излучением. Лазерное формирование шариков припоя с применением лазерного излучения длиной волны 10,6 мкм не



эффективна, поскольку излучения отражалась при падении на поверхности шарика. Использование лазерного излучения длиной волны 532 нм дает возможность уменьшения диаметр излучения до десятков микрометров, также больше интенсивности при одной и той же мощности излучения и, следовательно, лучше способность локального нагрева. В этом отношении целесообразно применение твердотельного лазера с длиной волны 532 нм.

5. Исследованы прочность сформированных соединений и высота бампов припоя. Средняя высота микровыводов, сформированных из шариков диаметром 80 мкм составляет 71,7 мкм, а шарик 800 мкм – 250 мкм. Средняя прочность соединений из шариков припоя диаметром 80 мкм составляет 0,64 гс.

6. По полученных результатов моделирования и экспериментального исследования разработана практическая рекомендация. Для среднесерийного производства рекомендуется автоматическая установка монтажа объемных выводов методом лазерной пайки ЭМ-4452. В качестве лазерной системы рекомендуется использовать LS-2151 пикосекундный Nd:YAG лазер. Основным методом повышения точности и качества лазерной размерной обработки является МИО что позволяет расширить технологические возможности лазерного нагрева и получить бампы с высшее отношением высоты к диаметру.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1. Фам, В.Т. Моделирование процесса лазерной пайки поверхностного монтажа // 55-я юб. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. 22-26 апреля 2019 г. – Минск, БГУИР. – С. 392–393.
2. Ланин, В.Л. Лазерное формирование отверстий в неметаллических подложках / В.Л. Ланин, В.Т. Фам, Н.Д. Чан // Электронная обработка материалов, 2020, (56), № 1. – С. 76–83.
3. Фам, В.Т. Моделирование лазерного формирования отверстий в неметаллических материалах / В.Л. Ланин, В.Т. Фам // 15-я Юбилейная междунар. молодеж. науч.-тех. конф. «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2019». 14–18 октября 2019 г. – Севастополь. – с.102.
4. Фам, В.Т. Моделирование лазерного нагрева шариков припоя при сборке 3D электронных модулей / В.Л. Ланин, В.Т. Фам // Материалы VI Белорусско-китайского молодежного инновационного форума «Новые горизонты 2019» 12–13 ноября 2019г. – Минск, БНТУ. – с.150–152.
5. Ланин, В.Л. Моделирование лазерного нагрева шариков припоя в пакете COMSOL Multiphysics 5.4 / В.Л. Ланин, В.Т. Фам // BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 13-14 апреля 2020 г. – Минск, БГУИР. – С. 94–96.
6. Фам, В.Т. Формирование микровыводов припоя на контактных площадках печатных плат импульсным лазерным излучением / В.Л. Ланин, В.Т. Фам // 56-я науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – 22-26 апреля 2020 г. – Минск, БГУИР. – С. 402–403.
7. Фам, В.Т. Моделирование процесса формирования микровыводов припоя импульсным лазерным излучением / В.Л. Ланин, В.Т. Фам // 16-я междунар. молодеж. науч.-тех. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ-2020», октября 2020 г. – Севастополь. – С.151.
8. Ланин, В.Л. Формирование шариковых микровыводов припоя с использованием лазерного излучения для Flip-Chip монтажа / И.Б. Петухов, В.Л. Ланин, В.Т. Фам // Технологии в электронной промышленности, 2020. – № 6. – С. 68–71.
9. Ланин, В.Л. Моделирование процесса термопередачи при прошивке кремниевой подложки лазерным излучением / В.Л. Ланин, В.Т. Фам, Петухов И.Б. // 13-я междунар. науч.-тех. конф. «Приборостроение — 2020» 18–20 ноября 2020 г. – Минск, БНТУ. – С. 387–388.
10. Фам, В.Т. Формирование отверстий в кремниевой подложке 3d электронного модуля лазерным излучением / Ланин В.Л., Фам В.Т., Лаппо А.И. // Доклады БГУИР. 2021. (в печати)
11. Фам, В.Т. Сборка 3D электронных модулей с использованием шариковых выводов припоя и лазерного излучения / В.Т. Фам // 57-я науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск: БГУИР, 2021. С. 266–270.