

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

УДК 621.791.312.6

Ковальчук  
Алексей Викторович

**Формирование контактных соединений на основе легкоплавких сплавов и углеродных нанотрубок при поверхностном монтаже 3D электронных модулей**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1–41 80 02 Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Научный руководитель  
Ланин Владимир Леонидович  
д.т.н., профессор

Минск 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Прогрессирующая автоматизация транспортных средств с помощью встроенных электронных приборов, а также потребность рынка в меньшей по размеру, недорогой и высоконадежной мобильной потребительской электронике являются движущей силой развития современных технологий электрических соединений.

Встроенные электронные чипы подвергаются механическим ударным воздействиям, длительным вибрациям и термическому циклированию, что приводит к расслаиванию и деградации паяных соединений в межсоединениях типа flip-chip. Высокоинтеллектуальные многофункциональные электронные приборы нуждаются в паяных соединениях, которые могли бы выдерживать эти суровые условия эксплуатации.

Замена свинецсодержащих припоев бессвинцовыми сплавами вызвала целый ряд проблем в области металловедения припоев. Эвтектические и близко эвтектические сплавы типа Sn-Ag-Cu (SAC) получили широкое применение несмотря на более высокую стоимость (в 3 раза выше стоимости ПОС 61) вследствие легкости применения и невысокой ползучести. Тем не менее, проблемы, связанные с металлургией и химией SAC сплавов, не решены для их применения в трудных условиях эксплуатации. Кроме того, надежность и механические свойства паяных соединений очень сильно зависят от микроструктуры литого припоя, морфологии и толщины интерметаллических соединений на межфазной границе. Образование больших пластинчатых интерметаллидов  $Ag_3Sn$  оказывает основное негативное воздействие на усталостные процессы, вызывает образование трещин и их распространение на межфазной границе  $Ag_3Sn$ / припой.

В технологии сборки 3D электронных модулей широкое применение получили бампы бессвинцового припоя SnAgCu, с помощью которых осуществляется электрическое контактирование корпусов BGA с платой. При формировании контактных соединений возможно образование интерметаллидных соединений между компонентами бессвинцового припоя и материалами финишных покрытий печатных плат, что снижает надежность изделий. Для повышения механических свойств, стойкости к термоциклированию и снижения температуры процесса соединения в состав легкоплавких сплавов предложено вводить углеродные нанотрубки.

Углеродные нанотрубки (УНТ), представляющие полые наноструктуры, состоящие из графитовой оболочки, являются в настоящее время предметом исследования в области материаловедения из-за своих уникальных электрических и механических свойств в сочетании с химической

стабильностью. Углеродные нанотрубки обладают высокими механическими свойствами с прочностью в 100 раз больше, чем у стали, в то же самое время в 6 раз легче.

Для модификации расплавов с целью повышения прочностных свойств используют ультразвуковые (УЗ) эффекты в жидких средах. Активация процессов пайки энергией ультразвуковых колебаний – одно из перспективных направлений в технологии РЭА и приборов. Введение механических упругих колебаний ультразвуковой частоты в систему – жидкий припой – основной металл позволяет резко интенсифицировать такие процессы, как смачивание, растекание, капиллярное течение, а также увеличить химическую активность припоя и основного металла. Развитие кавитационных процессов в жидком припое ускоряет разрушение оксидных пленок, имеющих на основном металле, и удаление их из зоны пайки, форсирует процессы нагрева припоя и металлов, неметаллических материалов. Одновременно с процессом кавитация в жидком припое возникают вторичные эффекты, также, как микро- и макропотоки, радиационное давление, которые также активно воздействуют на формирование паяного соединения. Для УЗ модификации сплавов характерны такие эффекты, как измельчение зерна, улучшение однородности структуры, смачивающей способности и механических свойств паяных соединений.

Введение адгезионно-активных добавок графена в микродозах в расплав бессвинцового припоя при воздействии интенсивных ультразвуковых колебаний приводит к измельчению зерен припоя, тормозит образование хрупких интерметаллидных соединений, таких как  $\text{Sn}_3\text{Cu}$  и  $\text{AgSn}$ , характерных для бессвинцовых припоев, на границах раздела фаз.

## 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 научной программы: ГБ 16-2020 «Материалы, технологические процессы и устройства электронно-оптических систем, электронных средств, биомедицинской и интегральной электроники».

### **Цель и задачи исследования**

Целью данной работы является моделирование и оптимизация параметров УЗ активации припоя в процессе формирования контактных соединений на основе легкоплавких сплавов и углеродных нанотрубок.

Для достижения поставленной цели было необходимо выполнить следующие задачи:

1. Провести анализ технологии УЗ-активации припоев при монтаже электронных модулей.
2. Выполнить компьютерное моделирование процессов кавитационного воздействия на процесс УЗ-пайки 3D электронных модулей с применением легкоплавких сплавов и углеродных нанотрубок.
3. Исследовать и оптимизировать процесс УЗ-активации припоев при монтаже 3D электронных модулей с применением легкоплавких сплавов и углеродных нанотрубок.

**Объект исследования** – УЗ-активация легкоплавких сплавов при монтаже 3D электронных модулей.

**Предмет исследования** – компьютерное моделирование формирования контактных соединений в 3D электронных модулях с активирующим воздействием УЗ-пайки с применением легкоплавких сплавов и углеродных нанотрубок.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.** В работе выполнено компьютерное моделирование процесса захлопывания кавитационного пузырька в припое легкоплавких сплавов и углеродных нанотрубок при УЗ-пайке с помощью комплекса *Matlab Bubblesim*, проведено моделирование прочности паяных соединений в 3D электронных модулях, проведены практические эксперименты по изучению процесса нанесения и

прочности паяных соединений в 3D электронных модуля. Результаты моделирования и натурных экспериментов позволяют оптимальным образом подобрать технологические режимы, что обеспечит качественную пайку в 3D электронных модулях.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Компьютерная модель процесса УЗ-активации легкоплавких сплавов с добавлением углеродных наночастиц.

2. Методика введения в состав легкоплавких сплавов на основе олова УНТ под воздействием интенсивных акустических колебаний амплитудой 20–25 мкм частотой 40–44 кГц в звукохимическом реакторе с кольцевым инфракрасным нагревом и облучения модифицированного УНТ бессвинцового припоя 96.5Sn/4Ag/Cu0,5.

3. Экспериментально установленные оптимальные режимы УЗ-активации легкоплавких сплавов с добавлением углеродных наночастиц (22 кГц, 1,5 Мпа), позволяющие наносить припой на труднопаяемые материалы и повышать прочность паяных соединений до 30% для чип-компонентов типоразмера 0805 и 23% для 2220.

### **Личный вклад соискателя**

Все основные научные результаты, представленные в работе, получены соискателем самостоятельно. В диссертации изложены результаты научно-исследовательских работ, выполненных автором в соавторстве (9 публикаций). В публикациях с соавторами личный вклад соискателя заключается в разработке методик исследований, постановке основных экспериментов, проведении теоретических и экспериментальных исследований.

Участие научного руководителя: доктора технических наук, профессора кафедры ЭТТ БГУИР Ланина В. Л. заключалось в обсуждении структуры, целей и задач исследований, обсуждении и обобщении результатов теоретических и практических исследований, проведенных автором самостоятельно.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных конференциях: II международной научно-практической конференции «Техническая акустика, проблемы, перспективы»; XIX международной научно-технической конференции «Молодежь в науке – 2016»; международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения»; 11-ая международная научно-техническая конференции молодых ученых и студентов; Международной научно-технической

конференции «Современные проблемы физики»; 54-й научно-технической конференции студентов и магистрантов БГУИР; а также публикациях в журнале «Технологии в электронной промышленности №1, 2017. Международной научно-технической конференции «Материалы и структуры современной электроники».

### **Опубликованность результатов диссертации**

По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них 9 статей в материалах научных конференций, 1 статья в научном журнале.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы из 41 наименований. Общий объем диссертации 55 страниц, в том числе 44 иллюстрации и 5 таблиц.

Во введении приводится обоснование актуальности работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приводятся характеристика технологий и оборудования для создания контактных соединений при монтаже электронных модулей с использованием УЗ энергии. Рассматриваются физические процессы при ультразвуковом воздействии на припой и параметры, влияющие на их эффективность при формировании контактных соединений.

Вторая глава посвящена созданию математических моделей в программном комплексе Matlab Bubblesim, а также их программная реализация. Выполнено моделирование процесса ультразвуковой активации расплавов легкоплавких сплавов с добавлением углеродных наночастиц, а также проведено моделирование прочности паяных соединений в 3D электронных модулях.

Третья глава содержит методику введения в состав легкоплавких сплавов УНТ, а также методики исследования УЗ-активации расплавов, формирования и контроля качества паяных соединений.

В четвертой главе диссертации представлены результаты исследования процесса пайки электронных модулей легкоплавкими сплавами с добавлением углеродных наночастиц УЗ-активацией, результаты исследования электрических импульсов при УЗ-пайке, а также результаты контроля качества паяных соединений.

Пятая глава даёт практические рекомендации по технологическим режимам пайки 3D электронных модулях, что позволит обеспечить их бездефектную пайку.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активация процессов пайки энергией ультразвуковых колебаний – одно из перспективных направлений в технологии монтажа 3D электронных модулей. Развитие кавитационных процессов в жидком припое ускоряет разрушение оксидных пленок, имеющих на основном металле, и удаление их из зоны пайки, форсирует процессы нагрева припоя и металлов, неметаллических материалов.

По результатам моделирования в программном комплексе Matlab Bubblesim оптимальными являются следующие параметры УЗ-активации припоев: УЗ-давление 1,5 МПа, частота 22 кГц, при которых растет резонансный размер кавитационных полостей и происходит их захлопывание.

Введение адгезионно-активных добавок графена в микродозах в расплав бессвинцового припоя при воздействии интенсивных ультразвуковых колебаний приводит к измельчению зерен припоя, тормозит образование хрупких интерметаллидных соединений, таких как  $\text{Sn}_3\text{Cu}$  и  $\text{AgSn}$ , характерных для бессвинцовых припоев на границах раздела фаз. Согласно результатам моделирования, введение адгезионно-активных добавок графена, в микродозах в расплав бессвинцового припоя  $96.5\text{Sn}/4\text{Ag}/\text{Cu}0,5$  увеличивает силу разрыва паянного соединения в 3D электронных модулях на при УЗ-активации расплавов на 30 %, (с 12 Н до 15,6 Н) для типоразмера 0805 и 23% для типоразмера 2220 (с 15 Н до 68 Н).

По результатам натуральных экспериментов показана эффективность применения интенсивных акустических колебаний в звукохимическом реакторе для модификации легкоплавких сплавов, при помощи УНТ. Разработан состав многофункционального припоя основе олова, 1–3,5 % серебра, 0,7–3,0% меди с добавлением УНТ размером 1–10 нм, который обеспечивает повышение механической прочности паяных соединений, увеличивает их стойкость к термоциклированию в диапазоне  $-40$ – $+125^\circ\text{C}$  за счет снижения роста интерметаллических фаз в сплаве. Модификация состава бессвинцового припоя позволяет повысить прочность паяных соединений и обеспечить возможность пайки труднопаяемых материалов (сапфирового стекла, фторопласта и др). Применение легкоплавких сплавов с УНТ при сборке и монтаже SMD компонентов повысит механическую прочность контактных соединений в 3D электронных модулях, а также в мощных полупроводниковых приборах и других изделиях электроники.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1. Белоцкий, И.П. Активность кавитации в неоднородном поле звукохимического реактора / И.П. Белоцкий и [др.] // Материалы конференции «Техническая акустика, проблемы, перспективы»: – Витебск, Беларусь: – 2016. – С. 97 – 99.
2. Ланин, В.Л. Ультразвуковая очистка в технологии электроники / В.Л. Ланин и [др.] // Технологии в электронной промышленности. – 2017. № 1. – С. 44 – 48.
3. Красовский, А.В. Исследование активности кавитации в неоднородном ультразвуковом поле // А.В Красовский и [др.]// Тезисы докладов конференции «Молодежь в науке – 2016»: – Минск, Беларусь: – 2016. – С. – 284.
4. Ланин, В.Л. Влияние углеродных наночастиц введенных в легкоплавкий сплав на прочность паяных соединений / В.Л. Ланин, А.В. Ковальчук // 11-ая международная научно-техническая конференции молодых ученых и студентов. Минск, 2018. – С. – 126.
5. Ковальчук, А. В. Исследование влияния импульсного модулирования ультразвукового поля на интенсивность звуколюминесценции и активность кавитации // А. В. Ковальчук и [др.] // Материалы конференции «Современные проблемы физики»: – М.: – МИРЭА. – 2018. – С. – 46 – 49.
6. Ланин, В. Л. Моделирование динамики кавитационной полости в расплавах припоев с добавкой углеродных наночастиц / В. Л. Ланин, А.В. Ковальчук // 54-ая научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 2019 г.
7. Ковальчук А.В., Спектральные характеристики кавитационного шума в гелевых имитатах // А.В. Ковальчук, и [др.] // Тезисы докладов конференции «Молодежь в науке – 2016»: – Минск, Беларусь: – 2016. – С. – 144.
8. Ланин, В. Л. Модификация припоев на основе легкоплавких сплавов углеродными нанотрубками для формирования контактных соединений в электронных модулях / В. Л. Ланин, А.В. Ковальчук // Материалы и структуры современной электроники: материалы VIII Междунар. науч. конф., Минск, 10–12 окт. 2018 г. – Минск : БГУ, 2018. – С. – 266 – 271.
9. Ланин, В.Л. Многофункциональные материалы на основе Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения легкоплавких сплавов и углеродных наночастиц для формирования контактных соединений в изделиях электроники / В.Л. Ланин, А.В. Ковальчук // Материалы конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения»: – М.: – МИРЭА. – 2017. – С. – 30 – 32.
10. Ланин, В.Л. Влияние углеродных наночастиц введенных в



легкоплавкий сплав на прочность паяных соединений / В.Л. Ланин, А.В. Ковальчук // 11-ая международная научно-техническая конференции молодых ученых и студентов. Минск, 2018. – С. – 126.