

Автоматическая установка клинового монтажа проволочных межсоединений малого диаметра 2,5D электронных модулей

И. Петухов, к. т. н.¹

УДК 621.396.6 | ВАК 05.27.06

Разработана автоматическая установка ультразвуковой микросварки алюминиевых и золотых проволочных выводов диаметром от 17,5 до 75 мкм при монтаже межсоединений в изделиях электронной техники, которая отличается программируемой системой подачи проволоки под рабочий торец микросварочного инструмента с углом подачи 30°/45°/60° и обеспечением монтажа выводов с большой разновысотностью уровней сварки, что характерно для изделий 2,5D-конструкции. Определены факторы, влияющие на качество микросварных соединений при настройке ультразвуковой системы.

ВВЕДЕНИЕ

Постоянный рост миниатюризации многокристалльных сборок с обеспечением высокой функциональности объясняется как техническими, так и экономическими соображениями. Очевидно, что набор определенных кристаллов, установленных на объединительной подложке (интерпозере), позволяет создать необходимый функционал в сжатые сроки даже без использования фотолитографии. Топология интерпозера (рисунок межсоединений и контактных площадок) может быть выполнена установками лазерной обработки материалов с использованием «мягкого» режима лазерного выпаривания металлизации шириной 15–20 мкм на Si- или FR4-подложке (рис. 1). Дальнейшая миниатюризация и наращивание функционала конечного изделия может обеспечиваться за счет монтажа кристаллов в виде многослойных конструкций и многоярусных интерпозеров (например, по технологии внутреннего монтажа) [1].

Для обеспечения межсоединений «кристалл – интерпозер – элементы поверхностного монтажа – кристалл» могут использоваться технологии как flip-chip, так и проволочного монтажа. Проволочный монтаж остается одним из основных методов сборки полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, что объясняется универсальностью метода по отношению к различным технологическим вариантам производства и геометрическим размерам изделий, высокой автоматизацией процесса и его большей доступностью [2].

В настоящее время монтаж проволочных выводов для маломощных приборов осуществляется в основном золотой или алюминиевой проволокой диаметром от 17,5 до 75 мкм. Для силовой электроники используется алюминиевая проволока диаметром от 100 до 500 мкм или ленточные выводы от 250 × 80 до 700 × 250 мкм (ширина × толщина) [3]. При монтаже золотой проволокой используются методы термокомпрессионной, термозвуковой микросварки и сварки расщепленным электродом. Термокомпрессионная и термозвуковая микросварки подразделяются на методы «шарик – клин»

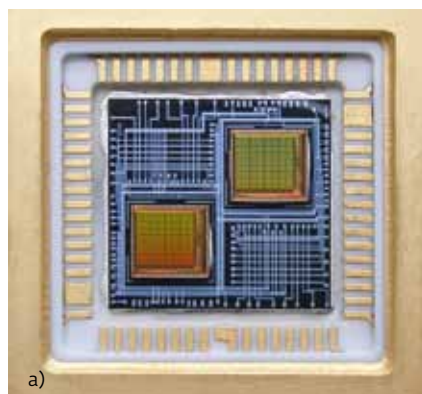
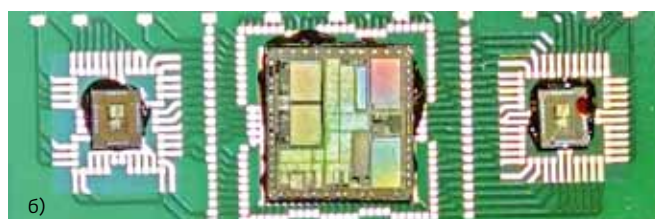


Рис. 1. Примеры интерпозеров (подложки межсоединений): а – кремниевая подложка с установленными кристаллами; б – микросборка на основе FR4



¹ ОАО «Планар-СО», начальник научно-технического центра, petuchov@kbtem.by.

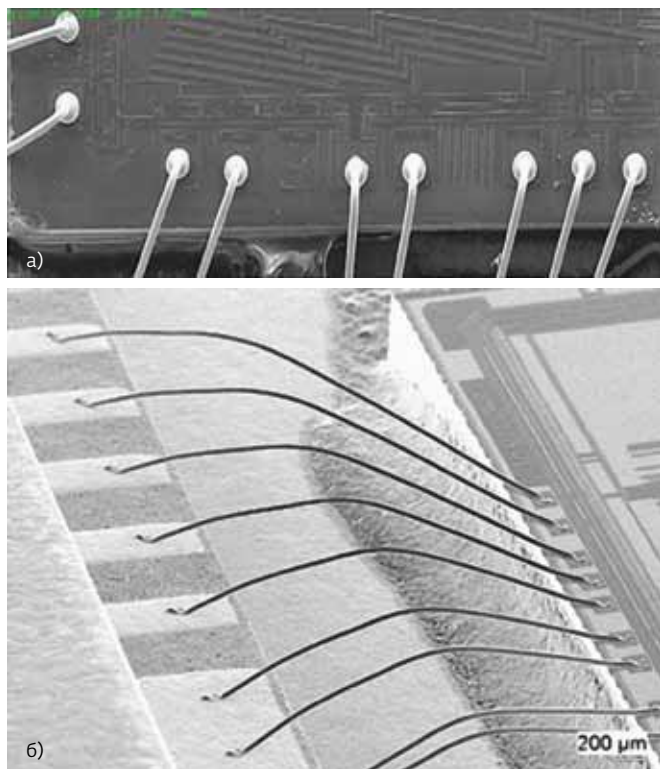


Рис. 2. Методы микросварки: а – «шарик – клин»; б – «клин – клин»

и «клин – клин» (рис. 2). Алюминиевая проволока используется при ультразвуковой (УЗ) микросварке методом «клин – клин» ввиду невозможности формирования шарика на конце проволоки из-за ее окисления.

ПРОБЛЕМЫ МОНТАЖА МЕЖСОЕДИНЕНИЙ В 2,5D-ИЗДЕЛИЯХ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Процесс УЗ-микросварки в технологическом плане обусловлен следующими параметрами: мощностью колебательной системы, контактным усилием (нагрузением) системы «торец микросварочного инструмента – проволока – контактная площадка», амплитудой колебаний микросварочного инструмента и временем сварки. Очевидно, что чем тоньше используемая проволока, тем точнее должны задаваться исходные параметры и поддерживаться их заданные значения в процессе присоединения. Применение тонкой проволоки диаметром <math><20\text{ мкм}</math> связано в первую очередь с размерами контактных площадок кристаллов <math><70 \times 70\text{ мкм}</math>, а значит, и малой площадью соединения. Анализ технических характеристик установок клинового присоединения выводов ведущих мировых производителей, таких как Hesse & Knipps [4], Kulicke & Soffa [5], F&K Delvotec [6] и ASM [7], показывает, что особое внимание при этом уделяется определению момента контактирования с точкой присоединения проволоки и управлению нагрузением. В процессе сварки при

необходимости могут задаваться различные профили усилия, например трапецеидальный, ступенчатый и др.

Для специфических приборов, построенных по архитектуре 2,5D с заложенной в конструкцию большой разновысотностью уровней сварки (например, 4 мм), необходимо поддерживать вертикальное положение микросварочного инструмента на позиции присоединения (рис. 3). Это обеспечивается различными конструктивными решениями, например установкой сварочной головки (СВГ) на привод перемещения по вертикальной оси и подвеской ультразвукового преобразователя в СВГ на управляемый упругий параллелепипед с диагонально расположенным пьезоактуатором (Hesse & Knipps), либо на традиционных подшипниковых опорах или плоскопараллельных пластинах.

Усилие $F_n(t)$ (рис. 3) на микросварочный инструмент создается в большинстве случаев электромагнитным актуатором – катушкой в поле постоянного магнита по типу звуковой катушки (voice coil motor), ввиду простоты конструкции и возможности программирования посредством задания тока через катушку. В установках производства Hesse & Knipps нагружение программируется специальным пьезоактуатором. Преимуществом подвески на плоскопараллельных пластинах является отсутствие трения качения и повышенная износостойкость по сравнению с узлами на подшипниковых опорах, что делает их вариантом, привлекательным для применения в системах УЗ-микросварки. Однако у подвески на плоскопараллельных пластинах есть и недостаток: зависимость усилия в зоне сварки от величины перебега СВГ. Перебег гарантирует необходимую степень деформирования проволоки для образования «клина» в процессе сварки;

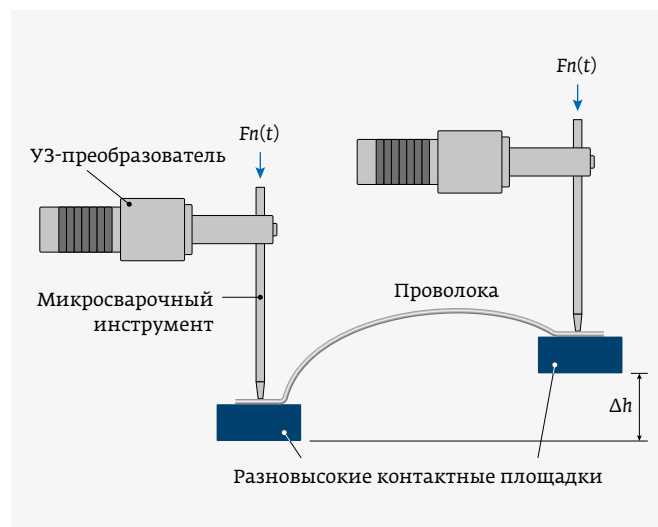


Рис. 3. Положение УЗ-преобразователя при формировании проволочного межсоединения (движение справа налево) с разновысотностью точек сварки Δh

обычно его величина устанавливается равной диаметру проволоки.

Наличие перебега в схеме движения СВГ приводит к тому, что после момента контактирования подвеска УЗ-преобразователя под действием плоскопараллельных пластин отрывается от неподвижного упора, являющегося ее опорой в исходном положении. Таким образом, в момент сварки к предустановленному сварочному усилию прикладывается упругая сила изгиба плоскопараллельных пластин подвески УЗ-преобразователя [8] и возникает необходимость принимать меры по компенсации этого недостатка с помощью схмотехнических решений системы управления нагрузением.

Для обеспечения высокой производительности микросварочной установки необходимо перемещать СВГ на больших скоростях. Очевидно, что при присоединении тонкой проволоки диапазон сварочных усилий смещается в область пониженных значений; например, для проволоки диаметром 18 мкм это диапазон 17,0–18,5 г. При быстрых перемещениях по осям X, Y, Z от одного места присоединения к другому возникают вибрационные шумы на входе датчика касания, выполняемого, в частности, в виде электрической контактной пары «упор – подвеска УЗ-преобразователя». Для их минимизации необходимо увеличивать усилие сжатия механической системы «упор – подвеска УЗ-преобразователя».

Из вышесказанного следует, что управлять электромагнитным нагружением требуется не только в точках

присоединения, но и «в полете» – при формировании петли между этими точками. Наиболее удачно данные проблемы решены в установке VJ820 фирмы Hesse & Knipps за счет инновационной СВГ со значительно уменьшенной массой, что позволило достичь производительности клиновой микросварки до 7 выводов в секунду.

Оценки качества соединений производятся на сегодняшний день тянущим усилием, создаваемым крючком с зацеплением испытываемого вывода, и сдвигом соединения микролопаткой на установках контроля прочности от многих производителей, в том числе и ОАО «Планар-СО» [9]. Фактически данная операция является важным элементом достижения оптимальной настройки установки при соединении. Из результатов проводимых тестов можно также сделать вывод о показателях настройки ультразвуковой системы (УЗС) и согласования ультразвукового преобразователя с микросварочным инструментом.

Состояние УЗС контролируют путем визуализации комплексной проводимости вблизи резонансной частоты измерителями импеданса. При этом рекомендуется обращать внимание на сдвиг резонансной частоты ультразвукового преобразователя при испытаниях без микросварочного инструмента и с установленным (зажатым в волноводе) инструментом. Пример визуализации настройки УЗС установки клиновой микросварки ЭМ-4520 показан на рис. 4.

Ключевыми параметрами на рис. 4а являются: резонансная частота F_s (99,85 кГц), добротность Q_m (697)

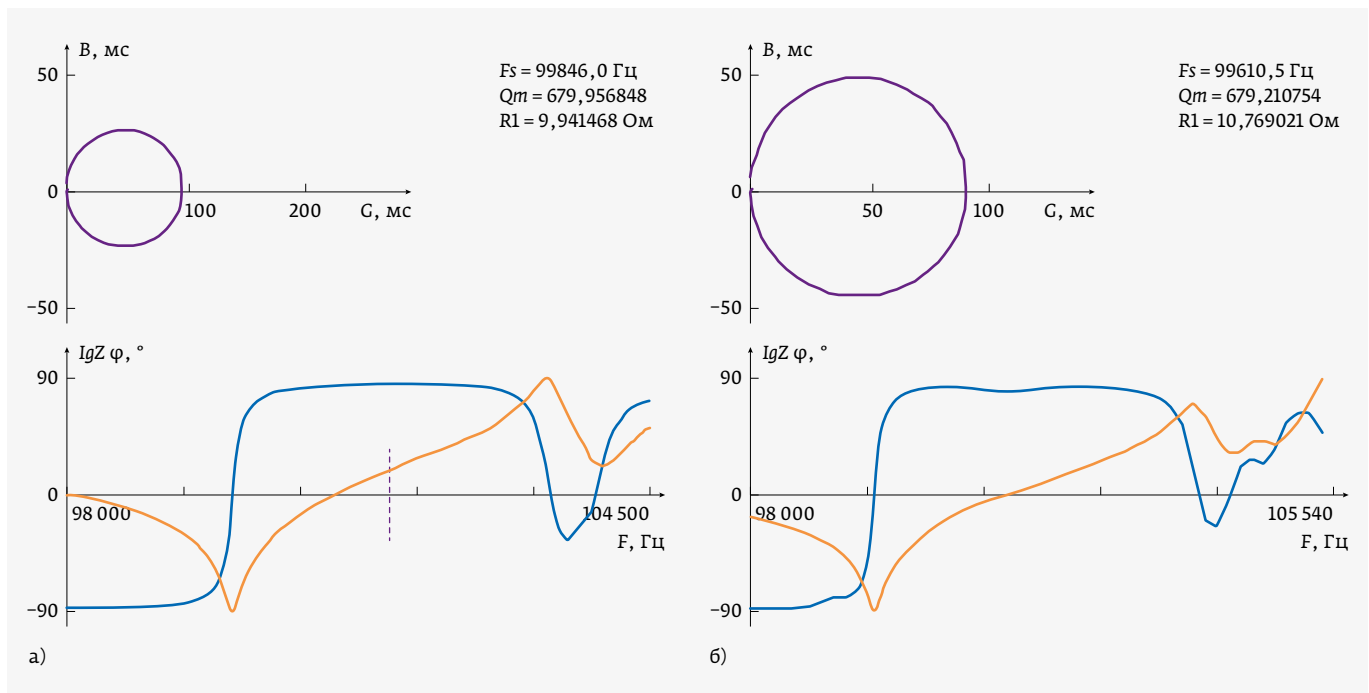


Рис. 4. Визуализация параметров УЗС установки клиновой микросварки: а – без установленного микросварочного инструмента; б – с установленным микросварочным инструментом длиной 21 мм

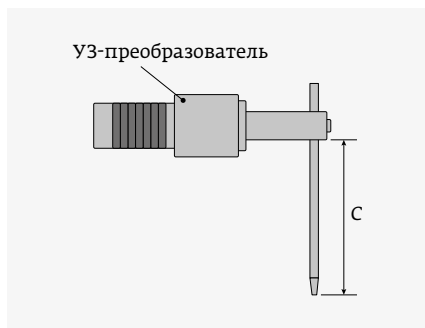


Рис. 5. Размер вылета (С) микросварочного инструмента в волноводе

и импеданс $R1$ (9,94 Ом). При установленном микросварочном инструменте длиной 21 мм (рис. 4б) видно, что резонансная частота УЗ-преобразователя при оптимальном подборе положения зажима инструмента в волноводе составляет 99,61 кГц, добротность 679 и импеданс 10,77 Ом.

Экспериментально установлено, что при отклонении резонансной частоты УЗ-преобразователя с установленным инструментом от резонансной частоты преобразователя без инструмента более чем на 300 Гц качество присоединения резко ухудшается, вплоть до его отсутствия (прочность близка к нулю). Проведенное моделирование комплексного импеданса УЗ-преобразователя с различной установкой микросварочного инструмента в волноводе (в зависимости от размера С на рис. 5) по методике, предложенной в [10, 11], представлено на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что кривые комплексного импеданса УЗС пересекают нуль импеданса в нескольких точках на частоте резонанса 99,6 кГц. Из конструктивных соображений предпочтительными точками зажима являются

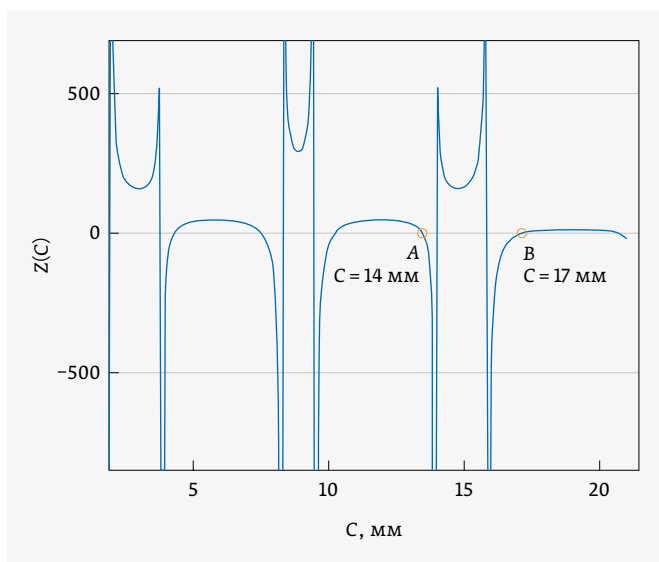


Рис. 6. Комплексный импеданс УЗС в зависимости от вылета (С) микросварочного инструмента длиной 21 мм в волноводе УЗ-преобразователя

точки А и В с размерами С, равными, соответственно, 14 и 17 мм при общей длине микросварочного инструмента 21 мм. На рис. 6 также видна нелинейность импеданса в районе пересечения нулевых точек. При смещении микросварочного инструмента от оптимального значения размера С возникает реактивная составляющая импеданса, что ведет к рассогласованию передачи ультразвуковой энергии в зону образуемого контакта.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ЭМ-4520 И ЕЕ СВАРОЧНАЯ СИСТЕМА

Сварочная технологическая система автоматической установки ЭМ-4520 состоит из прецизионной координатной системы, перемещающей СВГ по координатам X, Y, Z и φ (угол поворота). Внешний вид СВГ показан на рис. 7. В СВГ может использоваться как стандартный инструмент длиной 21 мм, так и сварочный инструмент длиной 25 мм, обеспечивающий глубокий доступ к зоне сварки присоединения проволочного вывода. Инструмент длиной 25 мм устанавливается в волновод заподлицо, образуя максимальный вылет инструмента. Инструмент длиной 21 мм согласуется, как показано выше, с вылетом (С) 14 мм. Угол подачи проволоки может быть отрегулирован на 30°, 45° и 60°.

В данной СВГ реализована моторизованная система отрыва-подачи проволоки на основе миниатюрного шагового привода, позволяющая программировать перемещение зажима проволоки при цикле отрыва и затем подачи ее под торец инструмента. Таким образом, регулировка такого важного параметра, как длина хвоста, возможна с монитора путем установки необходимых значений. Это особенно актуально при сборке многокристальных изделий, в том числе для образования межкристальных соединений и на контактных площадках малого размера. При этом нужно обращать внимание на геометрию рабочего торца микросварочного инструмента,

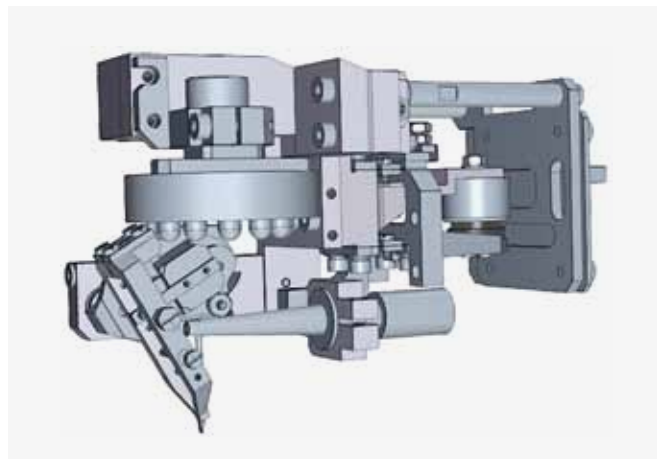


Рис. 7. Сварочная головка установки ЭМ-4520

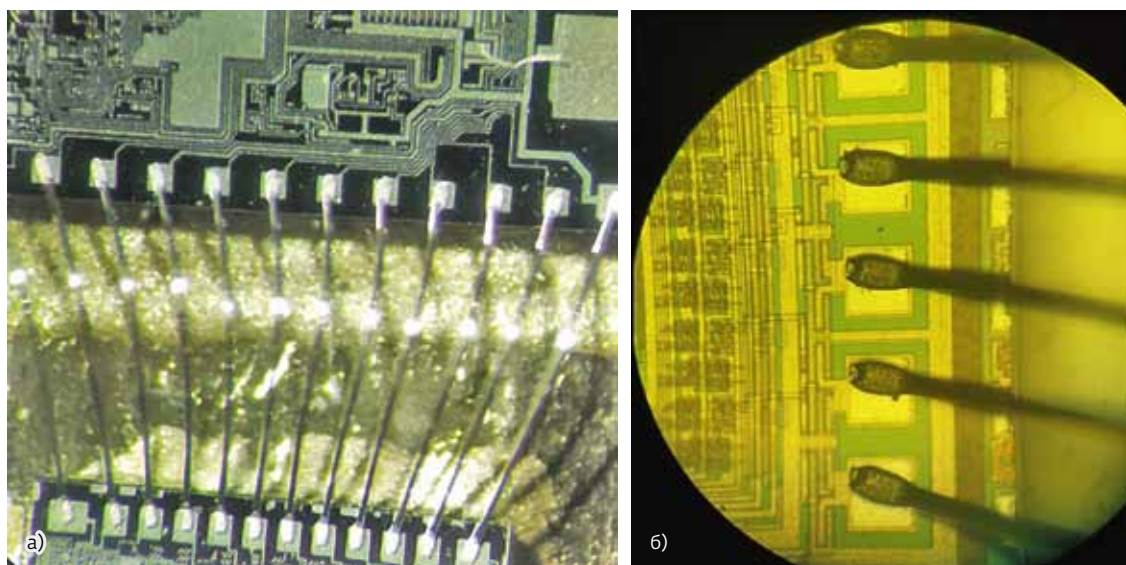


Рис. 8. Проволочные соединения, полученные на установке ЭМ-4520: а – межкристалльные соединения; б – вид соединений на контактных площадках кристалла

определяющую внешний вид и площадь сварного соединения, а также получить минимальный след отрыва проволоки на контактной площадке кристалла, достигаемый за счет выбора угла подачи проволоки.

Типовые соединения алюминиевой проволокой диаметром 30 мкм показаны на рис. 8. Проведенные тесты на прочность тянущим усилием показали значения в диапазоне 12–14 г. Экспериментально установлено, что минимизация следа отрыва достигается выбором микросварочного инструмента с рабочим торцом типа concave [12] с вогнутой рабочей поверхностью (рис. 9).

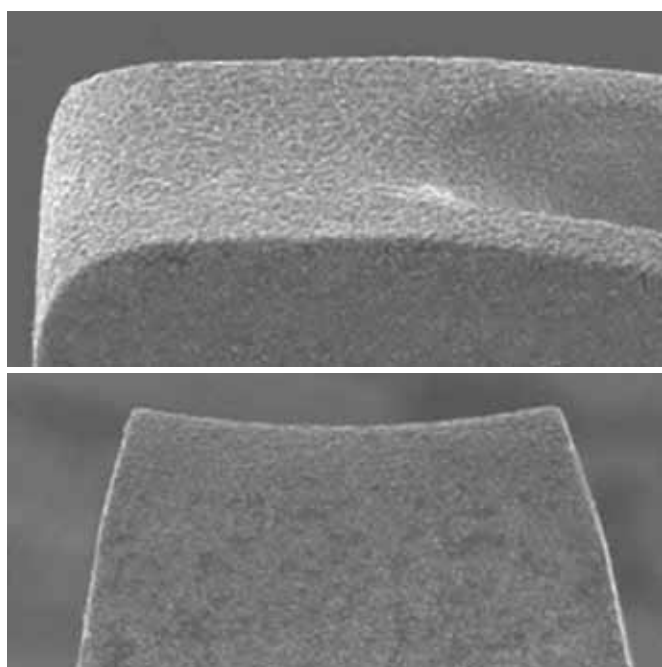


Рис. 9. Рабочий торец микросварочного инструмента типа concave

Внешний вид автоматической установки ЭМ-4520 показан на рис. 10. Основные технические характеристики установки ЭМ-4520 сведены в табл. 1.



Рис. 10. Автоматическая установка УЗ-микросварки ЭМ-4520



САМОЕ ПОСЕЩАЕМОЕ ОТРАСЛЕВОЕ
МЕРОПРИЯТИЕ СЕВЕРО-ЗАПАДА
РОССИИ!*

XXI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
& ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

21-23
СЕНТЯБРЯ
2022
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ



**НАПОЛНЯЙТЕ КЛИЕНТСКУЮ БАЗУ
- ОСНОВУ ВАШЕЙ ЭКОСИСТЕМЫ!**



*Выставку 2021 года посетили более 7 700 специалистов



www.radelexpo.ru
(812) 718-35-37

ВЫВОДЫ

1. Разработана новая ультразвуковая система для монтажа проводников из алюминия и золота диаметром в диапазоне 17,5–75 мкм, которая отличается программируемым безударным устройством отрыва-подачи проволоки, обеспечивающим прецизионную подачу проволоки под торец микросварочного инструмента.
2. Экспериментально установлено, что максимальная прочность при монтаже тонких проводников в диапазоне диаметров 17,5–75 мкм достигается при использовании микросварочного инструмента с рабочим торцом типа concave за счет большей площади взаимодействия свариваемых материалов.
3. Экспериментально установлено, что для оптимальной передачи ультразвуковой энергии в зону УЗ-сварки и достижения максимальной прочности соединения необходимо обеспечивать согласование УЗС таким образом, чтобы минимальный импеданс резонанса при установленном инструменте достигался на частоте, отклонение которой от частоты резонанса УЗС без инструмента не превышает 200–300 Гц.

Таблица 1. Основные характеристики автоматической установки ЭМ-4520

Метод сварки	Ультразвуковая сварка «клин – клин»
Режим работы	Совмещение и присоединение выводов – автоматически
Материал и размеры присоединяемых выводов, мкм	Al, Au-проволока ø17,5...80
Рабочее поле (X, Y, Z), мм	200×120×12
Воспроизводимость позиционирования координатной системы (X, Y, Z) при 2σ, мкм	1
Усилие сварки, программируемое в диапазоне, Н	0,1...2,0
Время цикла на монтаж одного вывода ø30 мкм, с	До 0,14
Выходная мощность УЗГ, Вт	Не менее 4
Длительность сварочного импульса, мс	1,0...255
Рабочая частота ультразвуковой системы, кГц	100
Максимальная разновысотность уровней сварки, мм	Не менее 5
Габаритные размеры, мм	1 000×1 200×1 800
Масса, кг	520

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вертянов Д. В., Петров В. С., Шабунин Д. А., Бураков М. М., Брыкин А. В.** Преимущества технологии внутреннего монтажа при производстве инерциальных систем на основе отечественных МЭМС // НАНОИНДУСТРИЯ. 2017. №74. С. 537–541.
2. **Достанко А. П. [др.]**. Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые. Минск: Бестпринт, 2009. 202 с.
3. The Importance of Interconnection Technologies: Reliability of Power Electronic Packages / S.Jacques // <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.69611>, 2017. P. 185–201.
4. <https://www.hesse-mechatronics.com/en/>
5. <https://www.kns.com/Products/Equipment/Wedge-Bonder>
6. <https://www.fkdelvotec.com/en/medien/downloads/>
7. <https://www.asmpacific.com/en/products?equipment=4>
8. **Петухов И. Б.** Стабилизация сварочного усилия в процессе ультразвукового монтажа проволочных и ленточных выводов // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. 2021. №1–2. С. 49–53.
9. **Петухов И. Б., Ланин В. Л., Емельянов В. А.** Технология и оборудование микросварки в производстве изделий электронной техники. Минск: Интегралполиграф, 2021. 186 с.
10. **Петухов И. Б.** Оптимизация параметров ультразвуковой системы повышенной частоты для микросварки проволочных выводов // Доклады БГУИР. 2012. №1 (63). С. 33–39.
11. **Петухов И. Б., Ланин В. Л.** Диагностика ультразвуковых колебательных систем в установках микросварки // Технологии в электронной промышленности. 2016. № 4. С. 66–68.
12. https://mpptools.com/wp-content/uploads/2020/08/wedge_catalog.pdf



ОТ ВСЕЙ ДУШИ
ПОЗДРАВЛЯЕМ ВАС С ДНЁМ
ВОЕННО-МОРСКОГО ФЛОТА!



ПРОЕКТИРОВАНИЕ



ГЕНЕРАЦИЯ
ИЗОБРАЖЕНИЙ



КОНТРОЛЬ
ФОТОШАБЛОНОВ



РЕМОНТ
ФОТОШАБЛОНОВ



ФОТОЛИТОГРАФИЯ



КОНТРОЛЬ
ПЛАСТИН



СБОРКА ИЗДЕЛИЙ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

ГЕНЕРАТОРЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Диапазон UV, DUV
- Проектная норма 90, 130 нм
- 16/32-лучевая архитектура
- Фазосдвигающие шаблоны
- Быстрая переналадка пластина – шаблон



КОНТРОЛЬ ФОТОШАБЛОНОВ

- Проектная норма 90, 130, 250 нм
- Твердотельный лазер
- Контроль методом D2DB, D2D
- Высокая производительность
- Контроль неплоскостности



РЕМОНТ ФОТОШАБЛОНОВ

- Фемтосекундный лазер
- 0.15/ 0.3/ 0.5 μm min элемент
- Размер шаблона до 9"x9"
- Ремонт копированием
- Ремонт через пелликл
- Прозрачные / непрозрачные дефекты



БЕЗМАСОЧНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Многоканальные лазерные генераторы изображений
- Проектная норма 0.35, 0.6 μm
- Высокая точность совмещения
- $\varnothing 200, 150, 100$ мм



СТЕППЕРЫ

- Проектная норма 0.35, 0.8 μm
- Автоматический масштаб
- Двустороннее совмещение
- $\varnothing 200, 150, 100$ мм
- Твердотельный источник света



КОНТАКТНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Ручная и автоматизированная загрузка
- Двусторонняя литография
- Высокая точность совмещения
- Низкий уровень генерации дефектов
- Высокая энергоэффективность



КОНТРОЛЬ ТОПОЛОГИИ

- Контроль привносимых дефектов пластин без топологии
- Автоматический микро и макро контроль дефектов пластин с топологией
- Высокая производительность



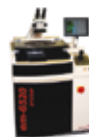
АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЕ

- Контроль микроразмеров
- Контроль неплоскостности
- Контроль координат
- Контроль толщин
- Контроль рассовмещения



ЗОНДОВЫЙ КОНТРОЛЬ

- $\varnothing 200, 150, 100$ мм
- ± 4 мкм погрешность контактирования
- Ручное / полуавтоматическое / автоматическое оборудование



РАЗДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИН И ПОДЛОЖЕК

- $\varnothing 300, 200, 150, 100$ мм
- 2 независимые зоны разделения в одной установке
- 2.4 кВт мощность электрощпинделя
- Полуавтоматическое / автоматическое оборудование



МОНТАЖ КРИСТАЛЛОВ И ВЫВОДОВ МИКРОСХЕМ

- Термозвуковая сварка
- Ультразвуковая сварка
- Контактная сварка



Создаем традиции будущего!

- Единое таможенное пространство
- 59 лет опыта в разработке и производстве прецизионного оптико-механического и сборочного оборудования
- Высокий уровень применяемых технологий и современного оборудования
- Полный цикл разработки и производства, высококвалифицированный персонал
- Высокое качество изделий подтверждено национальными и международными стандартами

220033, Республика Беларусь, г. Минск, Партизанский пр-т 2, корп. 2-31;
факс.: +375 17 226-12-05; тел.: +375 17 297-37-09; www.planar.by, office@kbtem-omo.by

ОТДЕЛ МАРКЕТИНГА
(Оптико-механическое оборудование)
тел.: (+375 17) 223-71-28, kbtem.omo@gmail.com

ОТДЕЛ МАРКЕТИНГА
(Оборудование подготовки кристаллов к сборке)
тел.: (+375 17) 223-22-26, planar_ovep@kbtem.by



planar.by