

Новое поколение установок ультразвуковой микросварки

Современная мировая промышленность производит более 60 миллиардов различных электронных устройств в год. Это разнообразные устройства, которые управляют системами персональных компьютеров, космических кораблей, самолетов, автомобилей, телевизоров, мобильными телефонами, цифровыми камерами, DVD-проигрывателями и т. д.

**Геннадий Ковальчук
Игорь Петухов**

petuchov@kbtem.by

**Владимир Ланин
Владимир Шевцов
Леонид Драгилев
Александр Лавринович**

Рынок требует больше функций в меньших по размерам, быстрых, более дешевых устройствах, которые собираются во множестве корпусов типов CSP, BGA, WCSP, TCSP, PLCC, SOIC, SOP и др. Сборка более чем 90% этих корпусов связана с технологией монтажа межсоединений золотой и алюминиевой проволокой [1]. Таким образом, технология межсоединений — это та критическая технология, которая соединяет микромир полупроводниковых чипов с внешним миром электронных устройств.

Современные требования полупроводниковой технологии предполагают отход от метода монтажа кристаллов с применением высокотемпературных эвтектик Au-Si (377 °C) и широкое использование низкотемпературных клеев композиционных материалов, а это значит, что нужно обеспечивать процесс присоединения при температурах 100...150 °C вместо 180...250 °C. Высокая степень интеграции ИС и уменьшение контактных площадок приводит к необходимости использования для межсоединений проволоки малого диаметра — из золота от 17,5 до 20 мкм и из алюминия для плоских проводников толщиной 12,5–18 мкм, а для круглых проводников — диаметром от 18 до 25 мкм, особенно в изделиях СВЧ-электроники.

Известно, что качественную работу любой установки присоединения выводов в изделиях электронной техники с использованием ультразвука определяет ее ультразвуковая (УЗ) система, включающая ультразвуковой преобразователь (УЗП) и ультразвуковой генератор (УЗГ). Рост производительности оборудования и уменьшение размеров контактных площадок на кристаллах требует прецизионной работы УЗ-системы и тщательного согласования УЗП с УЗГ, поскольку подводимые электрические колебания от УЗГ преобразуются УЗ-преобразователем в механические колебания. В свою очередь необходимо согласование рабочего микроинструмента с УЗП.

Требования к рабочему инструменту для УЗ-сварки формулируются следующим образом:

- Форма и размеры инструмента должны обеспечивать эффективную передачу энергии УЗ-колебаний с коэффициентом усиления >1 .
- Материал инструмента должен обеспечивать минимальное затухание УЗ-колебаний и не должен вступать во взаимодействие с материалом вывода.

Для присоединения проводников малого сечения (от 20 мкм и менее) при пониженной температуре сварки (100...150 °C) в промышленных условиях нужны новые автоматизированные установки. В их состав должны входить: прецизионная сварочная головка с программируемым усилием рабочего инструмента на позиции сварки по заданному профилю и УЗ-преобразователь с повышенной частотой резонанса, прецизионный механизм отрыва-подачи проволоки, цифровой УЗ-генератор с фазовой автоподстройкой частоты и с высоким разрешением задания параметров (амплитуда, длительность выходного импульса). Необходимо также осуществлять контроль сварочного процесса в каждой точке соединения, что позволит повысить качество выпускаемых изделий [2].

До начала 1990-х годов в установках термозвуковой сварки использовались УЗ-системы на частоте порядка 60 кГц. С 1991 года ведущие производители сборочного оборудования активно создают УЗ-системы повышенной частоты в диапазоне от 90 до 140 кГц [3]. Это связано с освоением технологии smart-card, когда необходимо осуществлять процесс присоединения золотой проволокой методом «шарик-клин» контактных площадок кристаллов с площадками на ленте фирмы Heraeus (Германия) при температуре не более 140 °C. Опыт эксплуатации УЗ-систем повышенной частоты в диапазоне 90–140 кГц показал, что при этом обеспечивается высокое качество и надежность соединений, а время сварки и температура процесса снижаются (до 120 °C). Это почти на 100 °C меньше температуры, при которой проводится термозвуковая сварка на стандартной частоте 60 кГц (200...220 °C).

Учитывая требования современного производства электронных изделий и опыт использования установок модельного ряда типа ЭМ-4320 [4], в УП «КБТЭМ-СО» ГНПО «Планар» разработано новое поколение полуавтоматических установок микросварки ЭМ-4320У и ЭМ-4320У-01.

Установка ЭМ-4320У универсальна, она совмещает три способа сварки: термозвуковую методом «шарик-клин», «клин-клин» и контактную сварку. Установка комплектуется тремя быстросменными сварочными головками, которые обеспечивают присоединение выводов диаметром 17,5–75 мкм. Программное обе-



Рис. 1. Установка микросварки ЭМ-4320У



Рис. 2. Установка микросварки ЭМ-4320У-01

спечение позволяет быстро выбрать соответствующий способ сварки в меню установки. ЭМ-4320У-01 предназначена для присоединения выводов из золота и алюминия диаметром от 12,5 до 75 мкм термовуком методом «клин-клин».

Для решения задачи формирования качественных микросварных соединений установки содержат следующие механизмы и системы:

1. Прецизионный моторизованный механизм дозированной бездефектной подачи проволоки с использованием стандартных 2-дюймовых катушек с проволокой фирм SPM (Малайзия) и Heraeus (Германия).
2. Прецизионные приводы по координатам Z и Y с дискретностью 1 мкм и быстродействующим датчиком касания для определения момента контакта рабочего инструмента с местом сварки, обеспечивающего минимальную деформацию проводника до начала сварки.
3. Сварочные головки с программируемым устройством нагружения, обеспечивающие минимальное усилие при касании на сварную точку 5–10 г и необходимый профиль сварочного усилия (постоянный, трапециевидный, ступенчатый) с дискретностью задания нагрузки не более 0,1 г в диапазоне 5–150 г и содержащие программируемый привод отрыва-подачи проволоки, осуществляющий подачу проволоки под инструмент с точностью 3–5 мкм.
4. УЗ-генератор с диапазоном частот 60–120 кГц и выходной мощностью 2,5 Вт с дискретностью установки 0,001 Вт. Для снижения температуры сварки до 100...150 °С разработан модельный ряд УЗ-преобразователей с повышенной частотой резонанса в диапазоне 95 ± 5 кГц и низким импедансом (10–25 Ом).
5. Датчик контроля деформации проводника в процессе сварки и устройство контроля сигнала датчика на основе микроконтроллера, что позволяет по сигналу датчика деформации оптимизировать процесс микросварки.

Для установки ЭМ-4320У-01 разработан механизм зажима проволоки с использованием биморфных пьезопластин фирмы PI (Германия) [5], обеспечивающий безударный зажим проволоки, тем самым исключается деформация проволоки диаметром менее 17,5 мкм.

Внешний вид установки микросварки ЭМ-4320У показан на рис. 1, а ЭМ-4320У-01 — на рис. 2. Модели содержат два блока управления. Справа расположен блок управления со встроенным малогабаритным компьютером и сенсорным 7-дюймовым монитором, а слева — блок управления приводом и периферийными устройствами. Система управления осуществляет программируемые перемещения сварочной головки по координате Z (по вертикали) и рабочего столика по координате Y (в направлении от оператора), а также управление приводом катушки с проволокой и приводом механизма отрыва-подачи. Все сварочные параметры программируются через дисплей и сохраняются в памяти установки. Каждая точка сварки стежка и сама форма петли могут быть индивидуально запрограммированы и сохранены в памяти установки. Таким образом, можно записать программу разварки конкретного прибора под своим именем и сохранить в памяти установки.

Для предварительного совмещения инструмента с точкой сварки используется световая указка, формирующая световое перекрестие на приборе. После перемещения сварочной головки в позицию совмещения вращением колесика манипулятора «мыши» можно медленно перемещать сварочную головку ближе к позиции сварки для точного совмещения торца инструмента с позицией сварки. Эта программная опция полезна при сборке приборов с разновысотными точками сварки и с контактными площадками малых размеров (40–50 мкм).

Интерфейс управления установки периферийными устройствами содержит дискретный ввод/вывод на основе платы PCI-1750 и четыре канала RS-232. Сварочная головка легко снимается после ослабления фиксирующего винта и отсоединения разъема плоского кабеля. Основными кнопками управления оператора являются две кнопки на манипуляторе: «пуск» и «зажим». На панели правого блока управления расположены кнопки включения и выключения установки, а также кнопка аварийного останова приводов.

Конструкция механизма подачи проволоки (рис. 3) предусматривает установку стандартных 2-дюймовых катушек с проволокой. Поворот катушки осуществляется от шагового привода, управляемого от системы управления установки. Для обеспечения постоянного натяжения проволоки предусмотрен подвод сжатого воздуха. В процессе разварки катушка автоматически поворачивается на программируемый угол, что обеспечивает свободную подачу проволоки. Свободное сматывание проволоки с катушки позволяет использовать проволоку малого диаметра, исключая натяжение проволоки и ее разрыв. Для удобства оператора при заправке проволоки предусмотрен поворот катушки в любую сторону при помощи манипулятора «мышь».



Рис. 3. Механизм автоматической подачи проволоки

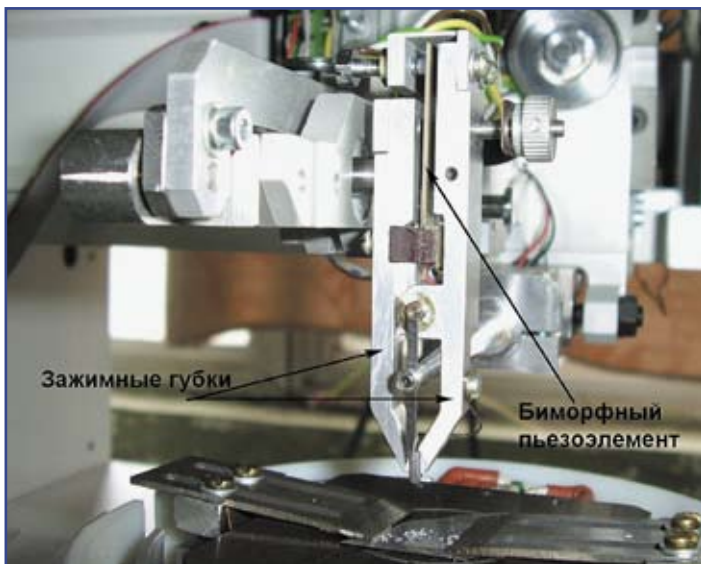


Рис. 4. Механизм зажима проволоки с пьезоприводом

Механизм зажима проволоки предусматривает использование в качестве привода электромагнит, а для установки ЭМ-4320У-01 в качестве привода используется биморфная пьезопластина. Преимущество пьезопривода (рис. 4) заключается в возможности управления его перемещения и безударном срабатывании. Измерение времени срабатывания зажима с использованием пьезопривода показало значение в диапазоне 8–10 мс, что меньше стандартного времени срабатывания зажима с электромагнитным приводом (15–20 мс). К недостаткам пьезопривода можно отнести более сложную систему управления. Разработанный электронный модуль управления пьезоприводом показан на рис. 5.

Особенностью нового поколения установок является применение в механизме отрыва-подачи маломощного шагового привода для программируемого перемещения зажимных губок проволоки. Это позволило стабилизировать подачу проволоки под инструмент и запрограммировать скорость отрыва проволоки после второй сварки: для проволоки диаметром менее 20 мкм скорость отрыва должна быть меньше для исключения разрыва проволоки между инструментом и зажимными губками.

При установке скорости отрыва необходимо также учитывать разрывное усилие проволоки и ее относительное удлинение, особенно при контактной микросварке. Программная интерполяция координат X и Y прецизионных приводов позволяет формировать петли стабильной формы при длине 150–200 мкм. Гибкость формирования петлеобразования обеспечивается набором программируемых параметров, показанных на рис. 6.



Рис. 6. Программа программирования петли

Для расширения области применения нового поколения установок микросварки разработан модельный ряд УЗ-преобразователей с резонансной частотой 95 ± 5 кГц для микросварки методами «шарик-клин», «клин-клин» (рис. 7) и УЗ-генератор с диапазоном частот от 60 до 120 кГц (рис. 8). Управление УЗГ может осуществляться по каналу RS-232 или по 8-битному параллельному порту. Широкий диапа-



Рис. 5. Модуль управления пьезоприводом механизма зажима проволоки

зон рабочих частот позволяет использовать УЗГ для модернизации эксплуатируемых установок с УЗ-системой 60 кГц. Результаты настройки УЗГ отображаются на дисплее установки присоединения. Встроенная система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) поддерживает работу УЗГ на резонансной частоте УЗ-преобразователя.



Рис. 7. Модельный ряд УЗ-преобразователей



Рис. 8. Плата УЗ-генератора

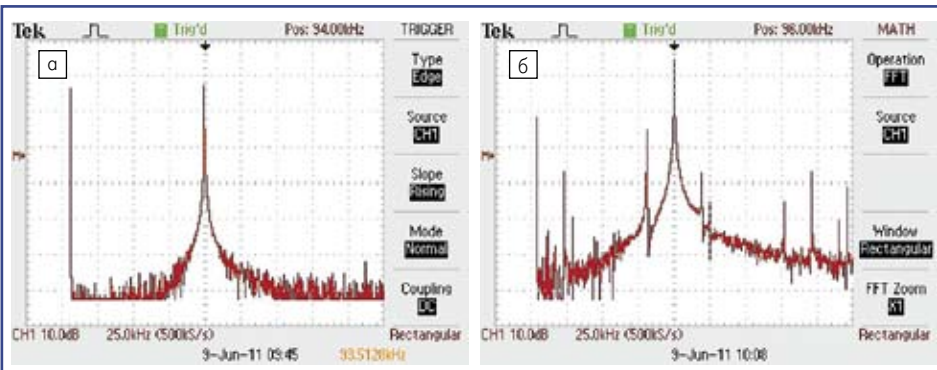


Рис. 9. Спектры колебаний торца инструмента:
а) при оптимальном согласовании; б) при неоптимальном согласовании

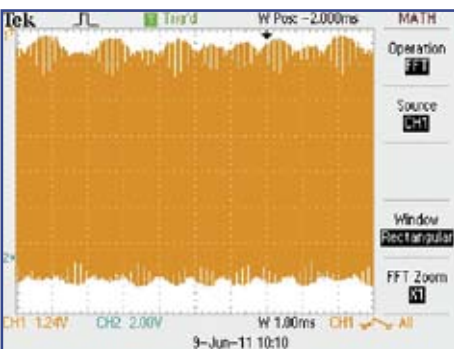


Рис. 10. Модулированный сигнал колебаний инструмента при рассогласовании с преобразователем

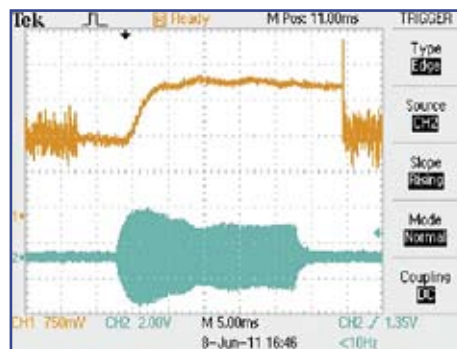


Рис. 11. Осциллограмма деформации при сварке алюминиевой проволокой диаметром 27 мкм (верхний луч) и профиля УЗ-импульса (нижний луч)

Для исследования спектра механических колебаний торца микроинструмента использовался лазерный датчик и функция быстрого преобразования Фурье осциллографа фирмы Tektronix (TDS2024B) с полосой пропускания 200 МГц.

При оптимальном согласовании инструмента с преобразователем спектр имеет вид, как на рис. 9а, а при рассогласовании в спектре колебаний появляются гармоники (рис. 9б), при этом сигнал колебаний инструмента модулирован по амплитуде (рис. 10).

Модуляция сигнала колебаний торца инструмента означает сложный характер колебаний, например, увеличение боковой составляющей колебаний, что может привести к дестабилизации сварочного процесса [6].

Повышение частоты УЗ-колебаний для сварки микропроводников следует рассматривать как возможность снизить величину амплитуды колебаний без изменения акустической мощности. Понижение амплитуды колебаний уменьшает знакопеременные напряжения в свариваемых материалах и опасность усталостного разрушения, вероятность которого особенно велика при сварке тонких проводников.

Для исследования деформации проводника при термовзвучиваемой сварке в сварочные головки установок ЭМ-4320У и ЭМ-4320У-01 встроены миниатюрный датчик Холла. Выходной сигнал датчика Холла зависит от расстояния между ним и постоянным магнитом, который в свою очередь закреплен на кронштейне держателя УЗ-преобразователя и перемещается во время деформации проводника. Типовая

осциллограмма сварочного процесса алюминиевой проволокой диаметром 27 мкм к кремниевой пластине с напылением алюминия показана на рис. 11. Из нее следует, что деформация достигает максимального значения через 10 мс после начала сварки и затем ее рост прекращается. При этом видно наибольшее затухание УЗ-импульса (нижний луч на осциллограмме). Далее процесс стабилизируется. Можно предположить, что на этой стадии происходит окончательное образование микросварочного соединения и возникновение интерметаллических фаз вследствие процесса диффузии. Это подтверждает тот факт, что уменьшение времени сварки до 10 мс приводит к отсутствию прочности сварного соединения.

Кривая деформации также отражает состояние сварочной головки с точки зрения наличия паразитных вибраций до начала сварки,

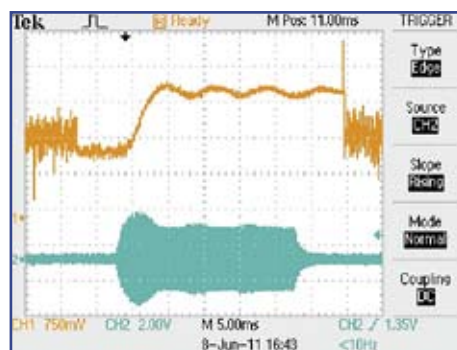


Рис. 12. Осциллограмма деформации при сварке до состояния покоя сварочной головки

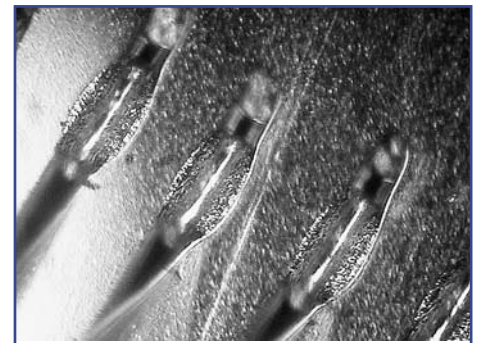


Рис. 13. Внешний вид сварных соединений алюминиевой проволокой диаметром 27 мкм

например после контакта с местом сварки на высокой скорости. На рис. 12 показана осциллограмма сварочного процесса после контакта на высокой скорости и нулевой задержке до пуска УЗГ. Колебательный процесс устраняется подбором скорости Z привода сварочной головки и задержкой пуска УЗГ.

Внешний вид сварных соединений алюминиевой проволокой диаметром 27 мкм показан на рис. 13. Разрушающие тесты тянущим усилием за центр перемычки показали прочность 9–11 г без отслоения сварных точек.

Тестовые присоединения золотой проволоки диаметром 20 мкм проводились на никелевых подложках с напылением серебра. Температура нагрева рабочей зоны — 140 °С. Типовая осциллограмма деформации сварочного процесса золотой проволокой методом «клин-клин» показана на рис. 14. Начало третьей фазы диффузионного процесса практически начинается через 7 мс. Однако, как и в случае присоединения алюминиевой проволоки, общее время сварки по результатам тестов на обрыв составляет 25 мс. Разрушающие тесты тянущим усилием показали прочность перемычек 5–6 г при исходном разрывном усилии проволоки 8 г и относительном удлинении 4%. Внешний вид сварных соединений золотой проволокой диаметром 20 мкм показан на рис. 15.

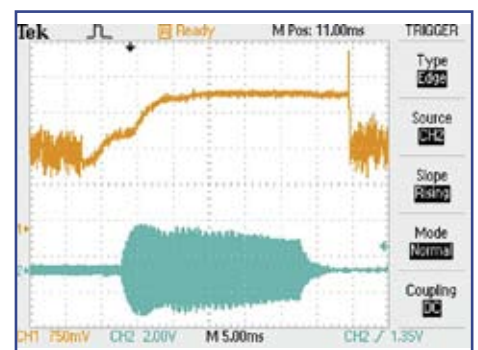


Рис. 14. Осциллограмма деформации при сварке золотой проволокой диаметром 20 мкм (верхний луч) и профиля УЗ-импульса (нижний луч)

Известно, что микросварка золотой проволокой методом «шарик-клин» начинается с процесса образования шарика на конце золотой проволоки. В установке ЭМ-4320У используется способ подачи на разрядник отрицательной полярности высокого напряжения, что позволяет получать шарики стабильного диаметра [7].



Рис. 15. Внешний вид сварных соединений золотой проволокой диаметром 20 мкм методом «клин-клин»



Рис. 16. Внешний вид соединений шариком на золотой проволоке диаметром 20 мкм

Внешний вид золотого шарика на конце золотой проволоки показан на рис. 16.

Четко виден бездефектный переход шарика в проволоку, так называемая «шейка». Это критическое место при образовании шарика из-за отжига проволоки при ее оплавлении. От размера отожженной проволоки, так называемой HAZ-зоны, зависит не только прочность образованной перемычки, но и ее формообразование [8].

Заключение

Разработано новое поколение полуавтоматических установок присоединения выводов — ЭМ-4302У и ЭМ-4320У-01, которые можно использовать в мелкосерийном производстве различных изделий электронной техники.

Универсальность установки ЭМ-4320У, совмещающей три вида сварки, может быть также полезна в учебных заведениях для исследования процесса микросварки и подготовки специалистов.

Литература

1. Prasad S. K. *Advanced Wirebond Interconnection Technology*. N. Y.: Kluwer Academic Publishers, 2004.
2. Кундас С. П., Ланин В. Л., Достанко А. П. и др. *Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники*. Т. 2. Минск: Бестпринт, 2003.
3. Ramsey T. H., Alfaro C. The effect of ultrasonic frequency on intermetallic reactivity of Au-Al bonds // *Solid State Technology*. Vol. 34. Dec. 1991.
4. Ланин В., Петухов И., Шевцов В. Ультразвуковое оборудование для сварки микропроводников // *Компоненты и технологии*. 2009. № 7.
5. PICMA Multilayer Bender Actuators — www.piceramic.com/Datasheet PL112-PL140
6. Фарассат Ф., Валев С. Контроль процесса ультразвуковой сварки: решение проблем мгновенной оценки качества, документирования и статистического анализа // *Электронные компоненты*. 2004. № 11.
7. Ланин В. Л., Цинман А. Ф., Петухов И. Б. Выбор полярности электрического разряда при формировании шарика в установках присоединения проволочных выводов // *Вестник ПГУ*. 2011. № 3.
8. Harmann G. G. *Wire bonding in microelectronics*. N. Y.: McGraw Hill, 2010.