

Контроль параметров ультразвуковых систем микросварки соединений высокой плотности

И. Б. Петухов

ОАО «Планар-СО»,

Партизанский пр. 2, г. Минск, 220033, Республика Беларусь, e-mail: petuchov@kbtem.by

Предложены методики автоматизированного контроля амплитуды и импеданса ультразвуковых систем микросварки, использующие бесконтактные методы регистрации отраженного луча лазера от движущейся поверхности, позволяющие оптимальным образом согласовать элементы ультразвуковых систем в диапазоне частот 50–120 кГц и обеспечить высокое качество и воспроизводимость свойств микросварных соединений высокой плотности (с шагом до 90 мкм). Данные методики применимы как для оперативной, так и периодической диагностики ультразвуковых сварочных систем оборудования присоединения выводов, поскольку не требуют трудоемкой разборки сварочной головки и использования стендового оборудования.

Ключевые слова: ультразвуковые системы, микросварка, соединения высокой плотности.

УДК 621.396.6

ВВЕДЕНИЕ

Прогрессирующая микроминиатюризация электронных компонентов и создание функционально сложных микроэлектронных устройств, в частности 3D-интегральных микросхем и многокристалльных модулей, вызвали особые проблемы в области формирования микросварных соединений. Одна из основных задач микросварки при сборке данных изделий – обеспечение большого числа (от 100 до 1000) надежных проволочных межсоединений с учетом разновысотности уровней микросварки между компонентами и уменьшения размеров контактных площадок активных структур из-за высокой степени интеграции. Для обеспечения размеров микросварных соединений высокой плотности с размерами контактных площадок на кристалле от 55x55 до 65x65 мкм и с шагом между соседними контактными площадками 20–30 мкм необходимо использовать проволоку малого диаметра (17–25 мкм), что предъявляет особые требования к настройке сборочного оборудования [1].

Уменьшение размеров контактных площадок на кристаллах интегральных схем требует прецизионной работы ультразвуковых систем (УЗС) микросварки, поскольку подводимые электрические колебания от генератора преобразуются ультразвуковым преобразователем (УЗП) в механические колебания на частоте резонанса УЗП и должны без потерь передаваться в зону сварки проволочных выводов. Поэтому требуются точный контроль параметров УЗС микросварки и оптимальное согласование рабочего инструмента с УЗП, поскольку УЗП с инструментом представляет собой электромеханическую резонансную систему, параметры которой (частота и входной импеданс) могут изменяться

в процессе работы, например при изменении статического усилия на УЗП. Поэтому для поддержания частоты резонанса все современные УЗ генераторы содержат встроенную фазовую автоподстройку частоты (ФАПЧ) и устройства компенсации изменения входного импеданса.

Термозвуковая микросварка методом «шарик-клин» в настоящее время является самым быстродействующим процессом присоединения проволочных выводов к контактным площадкам интегральных схем, который обеспечивает высокую плотность соединений. До 95% изготавливаемых в мире микросхем используют золотую проволоку для обеспечения надежных межсоединений между кристаллом и выводной рамкой. Быстрое развитие технологии сверхбольших интегральных схем и уменьшение размеров контактных площадок потребовало использование проводников диаметром менее 20 мкм и соответственно высокой воспроизводимости образуемых шариков [2].

Для создания микросварных соединений высокой плотности в УЗС термозвуковой сваркой применяют УЗ преобразователи повышенной частоты (с частотой резонанса более 100 кГц), что позволяет повысить производительность за счет сокращения времени сварки, а также уменьшить температуру зоны сварки. Возможность снижения температуры зоны микросварки особенно актуальна при сборке приборов на полимерных носителях, например кредитных карт, SIM карт и т.п. Такие УЗП характеризуются малыми амплитудами колебаний и повышенной чувствительностью к изменению нагрузки [3].

Контактные измерители вибраций иногда используют для настройки в резонансный режим работы УЗ систем микросварки. Однако такие

приборы позволяют осуществлять лишь периодический контроль амплитуды колебаний УЗ инструментов в процессе выполнения технологических операций, что затрудняет точную настройку технологического оборудования, приводит к выполнению технологической операции при неоптимальных режимах и увеличивает процент дефектных изделий. Недостаток данного метода измерения вибраций – зависимость показаний прибора от усилия нагружения щупа датчика [4].

Очень важным моментом настройки УЗ колебательной системы микросварки является корректная установка микроинструмента в зажиме – так называемый «вылет» инструмента. Необходимо, чтобы собственные частоты продольных колебаний УЗ преобразователя и изгибных колебаний инструмента совпадали. В противном случае резонансная частота примет какое-то промежуточное значение и в месте сопряжения увеличится реакция нагрузки (за счет реактивных составляющих), что может вызвать нарушение согласования преобразователя с инструментом и снижение амплитуды колебаний на рабочем торце инструмента. Рост требований к производительности оборудования и уменьшение размеров контактных площадок на кристаллах требуют прецизионной работы УЗ системы и тщательного согласования УЗП с УЗГ, поскольку подводимые электрические колебания от УЗГ преобразуются УЗП в механические колебания. В свою очередь, требуется согласование рабочего микроинструмента с УЗП.

Для исследования распределения амплитуды и частот колебаний вдоль УЗС микросварки применяют бесконтактный виброметр PSV-400 компании Polytec [5], являющийся наиболее передовым средством для бесконтактных измерений, визуализации и анализа колебаний различных конструкций. «Сердцем» прибора является лазерный доплеровский виброметр – высокоточный оптический датчик для определения виброскорости и амплитуды перемещения в заданной точке, принцип работы которого основан на интерференции отраженного луча лазера от движущейся поверхности с опорным лучом. Результатом интерференции двух лучей является изменение интенсивности излучения, фиксируемого фотоприемником. Это дает возможность измерения частоты колебаний от 0 Гц до 24 МГц, виброскорости от 0,02 мкм/с до 10 м/с и амплитуды колебаний от 0,1 до 100 мкм.

Цель работы – разработка методики контроля параметров УЗ колебательных систем микросварки для формирования микросварных соединений с высокой плотностью.

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ УЗ СИСТЕМ МИКРОСВАРКИ

При формировании микросварных соединений высокой плотности (с шагом до 90 мкм) с использованием проволоки малого диаметра (17–25 мкм) термозвуковой микросваркой разброс диаметров исходных шариков $\pm 2,5$ мкм с учетом погрешности позиционирования сварочной головки ± 4 мкм может привести к выходу сварного соединения за пределы контактной площадки и повреждению топологии кристалла. Необходимо учитывать, что разброс по деформации соединений шариком встык на кристалле сильно зависит от выбора геометрии рабочего торца инструмента (рис. 1), поэтому необходимо не только правильно выбирать капилляр, но и согласовывать инструмент с УЗ системой микросварки [6].

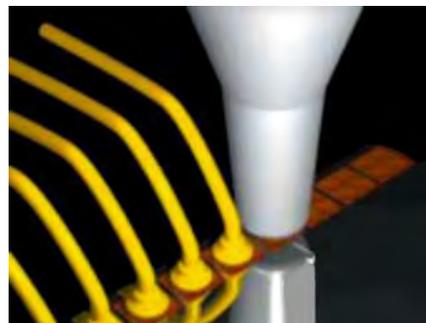


Рис. 1. Формирование микросварных соединений высокой плотности.

Для исследования распределения амплитуды в УЗ системе микросварки применяют виброметр PSV-400 с контроллером OFV-5000, оснащенный аналоговым и цифровым декодерами скорости, измерительной головкой, состоящей из сенсора виброметра PSV-I-400, высокоточного сканера и цветной видеокамеры с возможностью автофокусировки и 72-кратным увеличением. Для автоматической регистрации и записи данных виброметр соединен через блок коммутации и кабель с персональным компьютером с операционной системой Windows® XP. При скорости сканирования до 30 точек/с диапазон сканирования составлял $\pm 20^\circ$ по осям X, Y; угловое разрешение $< 0,002^\circ$, угловая стабильность $< 0,01^\circ/\text{час}$.

При отражении лазерного луча движущимся объектом происходит сдвиг частоты, величина которого определяется по формуле:

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda},$$

где v – скорость объекта; λ – длина излучаемой волны.

Для определения скорости объекта доплеровский сдвиг частоты с известной длиной волны

определяется с помощью лазерного интерферометра. Для измерения необходимо наличие двух наложенных друг на друга пучков когерентного излучения с интенсивностью I_1 и I_2 . Результирующая интенсивность определяется с учетом величины интерференционного члена по формуле:

$$I_{\Sigma} = I_{\downarrow 1} + I_{\downarrow 2} + 2\sqrt{I_{\downarrow 1}I_{\downarrow 2}} \cos\left(\left[2\pi(A_1(1-))\right]A_2\right)/\lambda,$$

где $A_1 = A(t)$ – движение объекта; $A_2 =$ постоянная.

Для проведения экспериментальных исследований распределения амплитуды УЗ колебаний вдоль оси сварочного инструмента и проверки оптимального согласования инструмента с волноводом УЗС разработан и изготовлен стенд контроля СКК-01, принцип работы которого основан на контроле сигнала фотоприемника лазерного полупроводникового излучателя, луч которого наполовину перекрывается телом рабочего инструмента (рис. 2). В стенде применен метод прямого контроля амплитуды механических колебаний, в отличие от сложных доплеровских интерферометров, измеряющих скорость колебаний и математически пересчитывающих в амплитуду. Дополнительным преимуществом метода является его нечувствительность к отражающим свойствам поверхности инструмента.

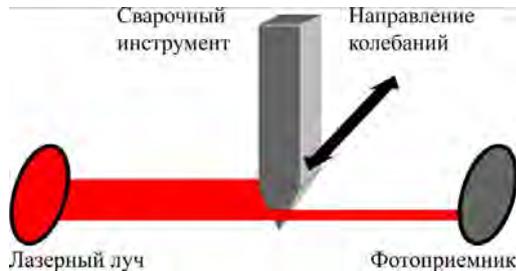


Рис. 2. Принцип работы лазерной системы контроля УЗ вибраций.

В рабочем режиме вибрация рабочего инструмента изменяет интенсивность лазерного луча, а фотоприемник регистрирует колебания УЗ частоты. Поскольку амплитуда колебаний достаточно мала (0,1–1,0 мкм), то сигнал с фотоприемника также мал и требует усиления и фильтрации. Лазерный луч модулируется на несущей частоте 1 МГц для исключения влияния внешней засветки и помех. Сфокусированный луч лазерного излучателя, попадая на рабочий инструмент, модулируется по амплитуде на УЗ частоте колебаний рабочего инструмента. Сигнал колебаний инструмента с фотоприемника поступает на прецизионный демодулятор, который выделяет полезный сигнал УЗ частоты и после фильтра низких частот с частотой среза 130 кГц поступает на пиковый детектор, выделяющий амплитудное значение (рис. 3). С помо-

щью аналого-цифрового преобразователя и микроконтроллера пиковое значение амплитуды выводится на ЖК-дисплей. Синусоидальный сигнал УЗ колебаний после низкочастотного фильтра выводится на осциллограф для наблюдения формы и амплитуды (рис. 4).

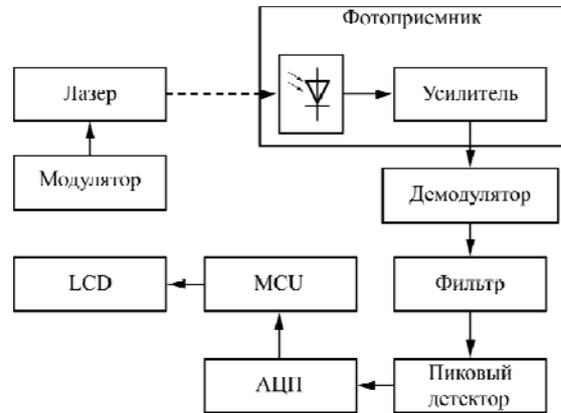


Рис. 3. Схема обработки сигнала фотоприемника стенда контроля колебаний.



Рис. 4. Стенд контроля колебаний СКК-01.

Положение УЗП с рабочим инструментом относительно луча регулируется микрометрическим винтом, приводящим в движение каретку с закрепленным УЗП, причем положение каретки и соответственно УЗП контролируется цифровым штангенциркулем. Таким образом, сдвигая положение инструмента относительно лазерного луча, можно контролировать распределения амплитуд колебаний вдоль оси инструмента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Динамические характеристики УЗП с резонансной частотой в диапазоне 60–70 кГц проверялись на сканирующем лазерном виброметре PSV-400 Polytec. Распределение амплитуды колебания вдоль сварочного инструмента, приведенное на рис. 5, показывает, что резонансная частота системы составляет 66,2 кГц, а амплитуда колебаний инструмента – 0,25 мкм. Данная модель виброметра позволяет измерять амплитуду колебания в диапазоне до 80 кГц, а для более высокого диапазона используют

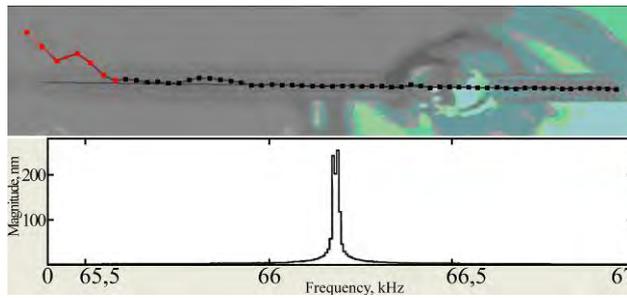


Рис. 5. Определение резонансной частоты колебаний в УЗ системе микросварки.

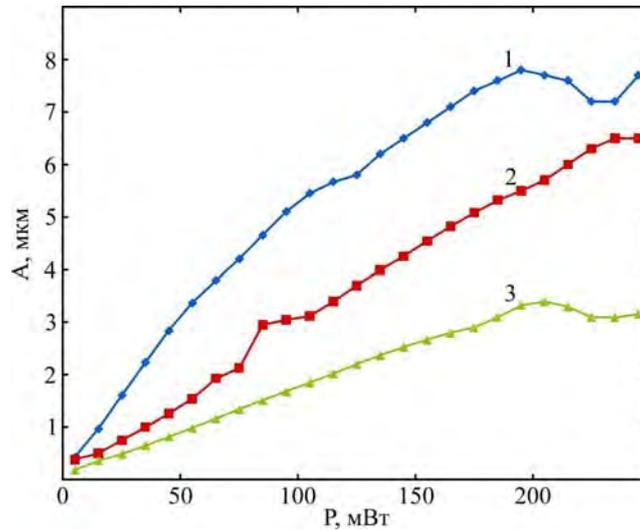


Рис. 6. Зависимости амплитуды колебаний рабочего инструмента от приложенной мощности и частоты УЗ.
1 – 60 кГц и диаметр 2,0 мм; 2 – 95 кГц и диаметр 1,6 мм; 3 – 60 кГц и диаметр 1,6 мм.

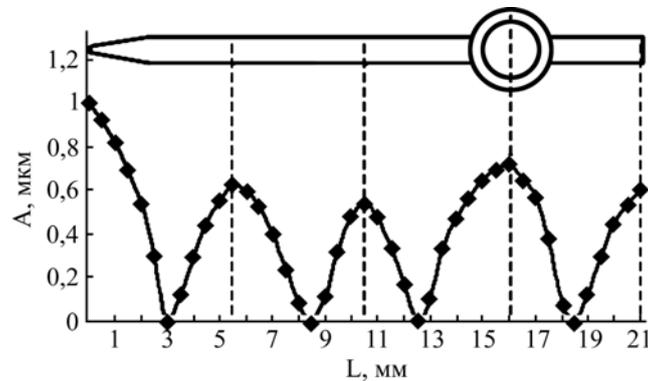
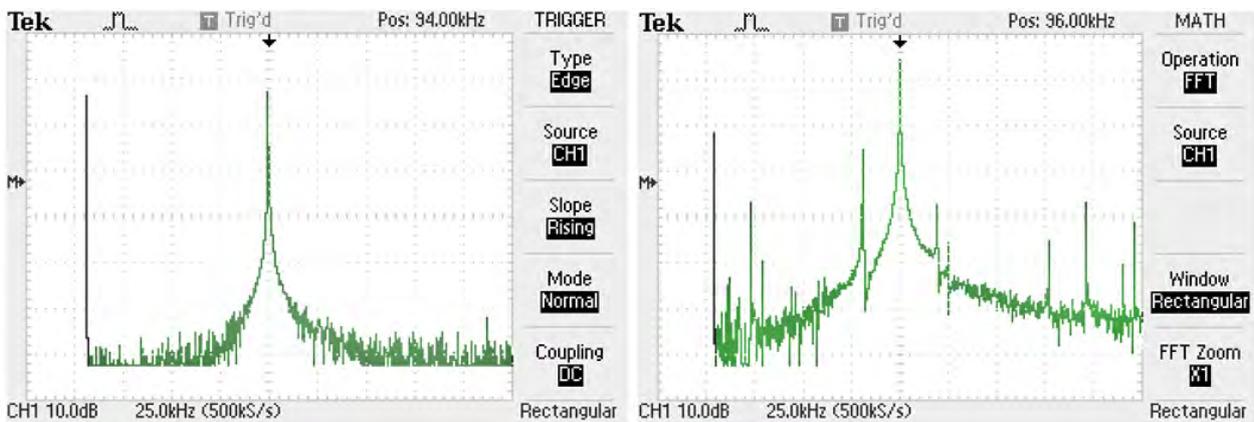


Рис. 7. Распределение амплитуды колебаний вдоль оси инструмента.



(а)

(б)

Рис. 8. Спектры колебаний торца инструмента при оптимальном согласовании и рассогласовании.

другой контроллер. С помощью подобной системы определяют не только распределение колебаний вдоль оси инструмента, но и исследуют спектр колебаний.

Результаты измерения амплитуды колебаний микроинструмента от приложенной мощности ультразвука приведены на рис. 6. Амплитуда колебаний практически линейно растет с возрастанием мощности ультразвука и достигает максимума, который определяется частотой колебаний и величиной диаметра инструмента.

Распределение амплитуды колебаний инструмента типа КУТ61-50-130-21 в УЗС с УЗП с частотой резонанса 94 кГц исследовалось на лазерном стенде СКК-01. В инструменте на частоте резонанса 94 кГц возникает стоячая волна с четырьмя узловыми точками, при этом амплитуда колебаний в рабочем торце увеличивается в 1,8 раза (рис. 7).

Осциллографом фирмы Tektronix мод. TDS2024B с полосой пропускания 200 МГц исследован спектр входных сигналов (рис. 8) с помощью быстрого преобразования Фурье при оптимальном согласовании и рассогласовании инструмента с преобразователем. При рассогласовании инструмента с преобразователем, то есть при произвольном вылете инструмента, в спектре колебаний появляются гармоники (рис. 8б), расположенные в районе резонансной частоты, а выходной сигнал модулирован по амплитуде. Подобные гармоники возникают также при плохом прилегании поверхности инструмента к поверхности установочного отверстия инструмента в УЗП [7]. Из осциллограммы следует, что частота резонанса равна 96 кГц вместо 94 кГц. Модуляция сигнала колебаний торца инструмента означает сложный характер колебаний, который может привести к дестабилизации сварочного процесса. Таким образом, с помощью этого метода можно определить оптимальное согласование с инструментами различной геометрии и длины.

О качестве УЗ преобразователя можно судить по таким параметрам, как частота собственного резонанса преобразователя, сопротивление преобразователя на резонансной частоте и форма кривых модуля и фазы импеданса преобразователя. Современный УЗ пьезокерамический преобразователь характеризуется сопротивлением 10–30 Ом на резонансной частоте между 90 и 120 кГц. Низкое значение импеданса УЗП обеспечивает минимальное смещение узловых точек на инструменте, что позволяет стабилизировать сварочный процесс при формировании соединений высокой плотности.

ВЫВОДЫ

Разработанные методики автоматизированного контроля амплитуды и импеданса УЗС микросварки, использующие бесконтактные методы регистрации отраженного луча лазера от движущейся поверхности, позволяют оптимальным образом согласовать элементы УЗ систем в диапазоне частот 50–120 кГц и обеспечить хорошее качество и воспроизводимость свойств микросварных соединений высокой плотности (с шагом до 90 мкм). Данные методики применимы как для оперативной, так и периодической диагностики УЗ сварочных систем оборудования присоединения выводов, поскольку не требуют трудоемкой разборки сварочной головки и использования стендового оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Integrated Interconnect Technologies for 3D Nano Electronics Systems*. Eds. M.S. Bakir, J.D. Meindl. London: Artech House, 2009. 528 p.
2. Harmann G.G. *Wire Bonding in Microelectronics*. NY: McGraw Hill, 3-d edition, 2010. 432 p.
3. Zhong Z., Goh K.S. *J Electron Manuf.* 2001, **10**(4), 365–371.
4. Ланин В.Л., Дежкунов Н.В., Томаль В.С. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2008, (2), 51–55.
5. Defect Detection Testing with PSV-400 and PSV-400-3D Scanning Vibrometers. <http://www.polytec.com/us/applications/application-notes/general-vibrometry/>
6. Ланин В.Л., Петухов И.Б. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2014, (2–3), 48–53.
7. Or S.W., Chan H.L.W., Lo V.C., Yuen C.W. *IEEE transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control*. 1998, (6), 45–49.

Поступила 04.11.15

Summary

Techniques of the automated control of amplitude and impedance of ultrasonic systems (US) of microwelding are offered as methods of registration of the reflected beam of the laser which allow to coordinate in the optimum the image elements of US systems in a range of frequencies of 50–120 kHz and to provide high quality and reproducibility of properties of the microwelded connections of high density (with a step up to 90 microns). The offered techniques are applicable for both operative and periodic diagnostics of US microwelding systems of the equipment of connecting terminals as they do not demand labour-consuming dismantling of the microwelding head and usage of the bench equipment.

Keywords: ultrasonic systems, microwelding, high density connections.