

Оптимизация параметров ультразвуковых преобразователей повышенной частоты

Владимир ЛАНИН,
профессор
vlanin@bsuir.by
Игорь ПЕТУХОВ
petuchov@kbtcm.by

На основе предложенных математических выражений определены оптимальные значения резонансной частоты и импеданса ультразвукового преобразователя повышенной частоты и условия закрепления инструмента в ультразвуковой системе микросварки проволочных выводов в процессах монтажа кристалла на плате (COB). Разработанная методика экспериментально подтверждена с помощью лазерного измерителя амплитуды колебаний. Оптимальное согласование элементов ультразвуковой технологической системы позволяет увеличить амплитуду колебаний инструмента и повысить прочность микросварных соединений при сварке на повышенных частотах.

Один из важных инструментов информационного общения в современном обществе, сравнимый по сферам применения и универсальности с сотовым телефоном, — это пластиковая смарт-карта (от англ. smart — интеллектуальная, разумная) со встроенной микросхемой. Степень «интеллектуальности» микросхемы может быть очень разной: от простейшего контроллера чтения/записи данных в электронную память карты до микропроцессора, имеющего развитую систему команд, встроенную файловую систему и т. п.

Для смарт-карт важна проблема миниатюризации, которая может быть решена за счет применения метода монтажа кристаллов на плату (Chip on Board, COB). В этом методе бескорпусные интегральные микросхемы монтируются на поверхность платы клеем, а проволочные выводы присоединяются к контактным площадкам ультразвуковой или термовзвукковой микросваркой (рис. 1). После разварки выводов микросхема залива-

ется непрозрачным компаундом, что помимо герметизации затрудняет разборку, идентификацию и копирование технических решений, повышая уровень безопасности интеллектуальной собственности.

Разварка проволочных выводов диаметром менее 20 мкм на контактные площадки печатных плат вызывает необходимость снижения амплитуды УЗ-колебаний для уменьшения механических напряжений в кристалле и снижения температуры термовзвукковой микросварки. С середины 1990-х годов в зарубежной электронной промышленности активно используются ультразвуковые системы в диапазоне повышенных частот (90–140 кГц), что имеет определенные преимущества для процессов проволочного монтажа микрочипов на подложки [1]. Увеличение частоты колебаний позволяет повысить температуру в локальной зоне сварки и обеспечить процесс формирования соединений за меньшее время и при снижении температуры нагрева всего изделия [2]. Возникает необходимость

обоснования использования рабочих инструментов стандартного ультразвукового диапазона 66 ± 5 кГц в диапазоне более высоких частот (>90 кГц).

Уменьшение размеров контактных площадок на кристаллах интегральных схем требует прецизионной работы ультразвуковых систем (УЗС), 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 необходимо оптимальное согласование рабочего инструмента с УЗП, поскольку УЗП с инструментом представляет собой электромеханическую резонансную систему, параметры которой (частота и входной импеданс) в определенных пределах могут изменяться в процессе работы, например при изменении статического усилия (программируемый параметр сварки) на УЗП. В связи с этим для поддержания частоты резонанса

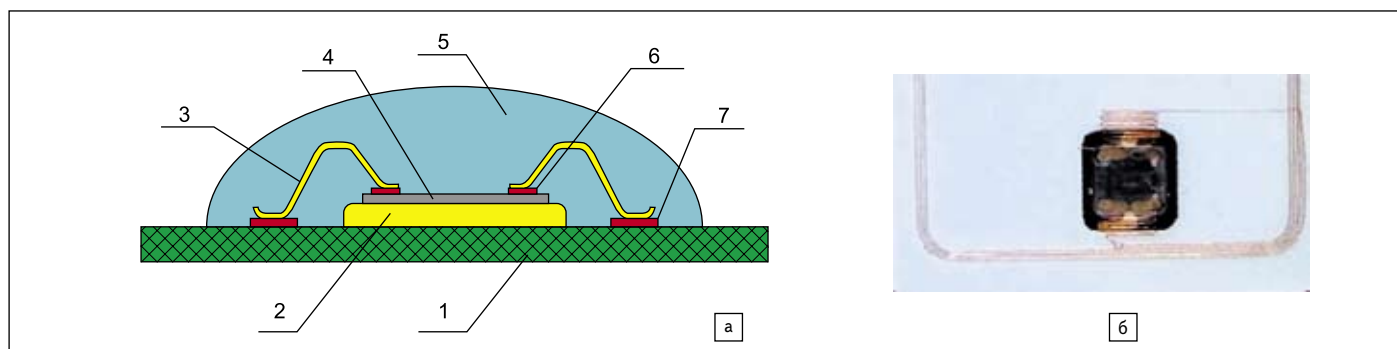


Рис. 1. Монтаж кристалла (а) и чипа (б) на плате:

1 — плата; 2 — адгезив; 3 — проволока (Al, Au); 4 — кристалл; 5 — заливающий компаунд; 6 — контактная площадка на кристалле; 7 — контактная площадка на плате

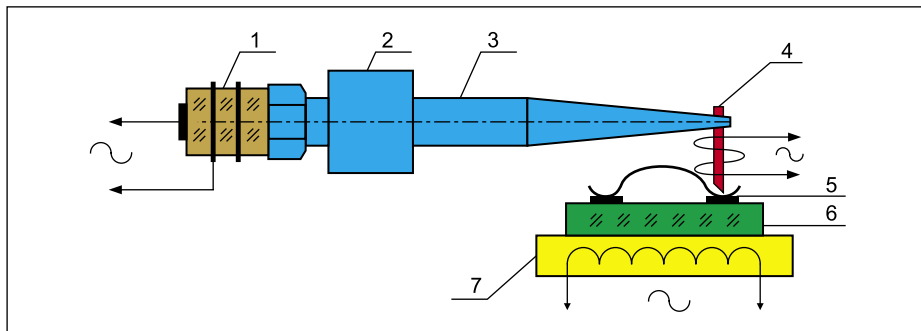


Рис. 2. Схема технологической системы микросварки: 1 — пьезоэлектрический вибратор; 2 — крепежный стакан; 3 — волновод; 4 — микроинструмент; 5 — проволочный вывод; 6 — кристалл; 7 — подогреваемый столик

все современные УЗ-генераторы содержат встроенную фазовую автоподстройку частоты (ФАПЧ) и устройства компенсации изменения входного импеданса.

Конструкция УЗ технологической системы микросварки (рис. 2) состоит из следующих составных частей: пьезоэлектрического вибратора, состоящего из четырех параллельно соединенных пьезокерамических колец, стянутых между собой шпилькой с металлическими накладками; цилиндрического держателя и волновода, предназначенного для крепления УЗС в сварочной головке установки. На конце волновода с помощью торцевого зажима закрепляется микроинструмент (рис. 3).

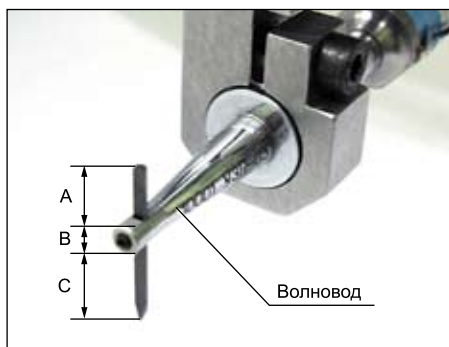


Рис. 3. Схема установки инструмента в волноводе: A — часть инструмента над волноводом; B — диаметр торца волновода; C — рабочий вылет инструмента

Очень важным моментом использования УЗ колебательной системы микросварки является корректная установка микроинструмента в зажиме: так называемый «вылет» инструмента. Согласно [3] 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.

Известно, что резонансная длина инструмента, закрепленного с одной стороны и сво-

бодного с другой, связана следующим соотношением [3]:

$$\frac{l^2}{r\lambda} = \frac{1}{4\pi} (kl)^2, \quad (1)$$

где l — длина вылета инструмента; λ — длина продольной волны; r — радиус поперечного сечения инструмента. Волновое число k , входящее в соотношение (1), определяется следующим образом:

$$k = \left(\frac{\omega^2 \rho S}{EJ} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2)$$

где ω — круговая частота колебаний, ρ — плотность материала инструмента; S — площадь поперечного сечения; E — модуль Юнга; J — момент инерции поперечного сечения инструмента. Значение произведения kl определяет моду колебаний с различным числом узлов и пучностей стоячей волны. Последовательный ряд значений произведения kl приведен в таблице [4].

Значения произведения kl можно также вычислить из частотного уравнения стержня, закрепленного с одной стороны и свободного с другой:

$$\cos kl \times \operatorname{ch} kl = -1. \quad (3)$$

Вычисления удобно производить в математическом пакете Mathcad, используя функцию root для нахождения корней уравнения, или графически по точкам пересечения функций $\cos kl$ и $\operatorname{ch} kl$, как показано на рис. 4.

Расчеты по формулам (1–3) позволяют вычислить длину инструмента на заданную резонансную частоту, но не учитывают диаметр торца волновода и оптимальное место зажима инструмента.

Зажим инструмента, или «вылет» микроинструмента (размер C на рис. 3), зависит от характеристик УЗП, резонансной частоты, материала, из которого изготовлен микроинструмент, и его геометрии. Например, для инструмента из карбида титана, используемого обычно для присоединения золотой проволоки, вылет на 0,5 мм меньше, чем у инструмента из карбида вольфрама, применяемого для присоединения алюминиевой проволоки. Для установки инструмента ведущие производители обычно прилагают к поставляемому оборудованию специальные шаблоны.

Для контроля колебаний на рабочем торце инструмента применяют метод прямого измерения колебаний, при этом инструмент находится между источником сфокусированно-

Таблица. Ряд значений произведения kl

$k_1 l$	$k_2 l$	$k_3 l$	$k_4 l$	$k_5 l$	$k_6 l$
1,875	4,694	7,855	10,996	14,137	17,279

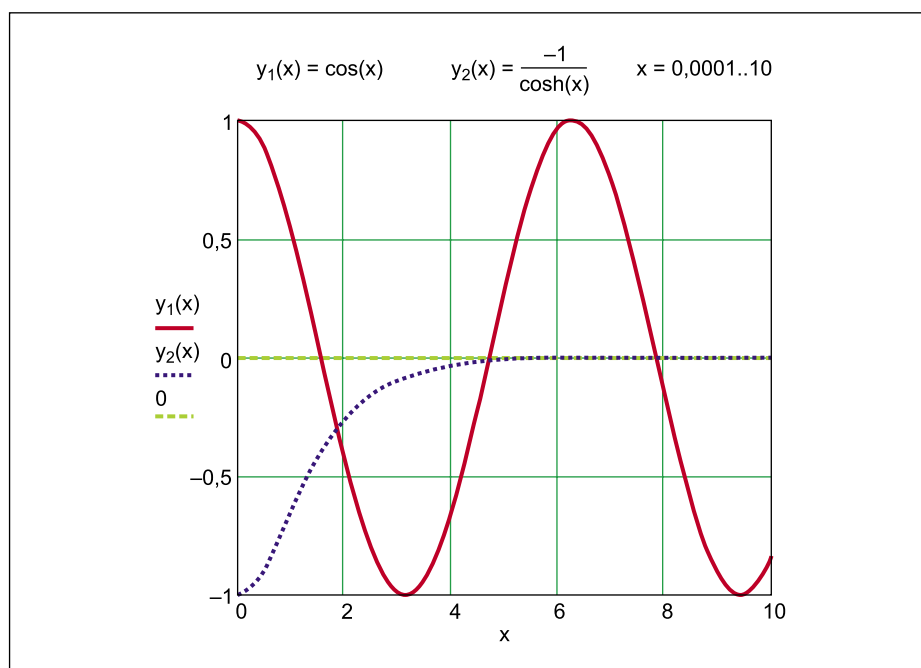


Рис. 4. Графическое определение произведения $kx l$ в пакете Mathcad

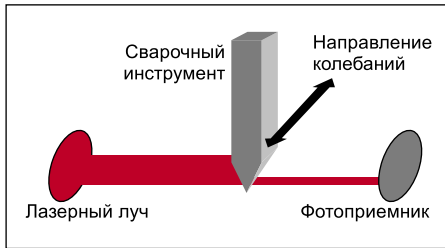


Рис. 5. Принцип работы лазерной системы контроля УЗ-колебаний

го лазерного излучения и фотоприемником. Примером является система ODS-20 фирмы F&K Physiktechnik (Германия) [5], с помощью которой можно измерить вибрации микросварочного инструмента в диапазоне 0,1–20 мкм на частотах от 30 до 250 кГц. Принцип работы такой системы показан на рис. 5.

Из теории изгибных колебаний известно, что уравнение колебаний стержня, закрепленного с одного торца, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^4 y(x)}{\partial x^4} - \frac{\omega^2 \rho S}{EJ} y(x) = 0, \quad (4)$$

где $y(x)$ — функция распределения амплитуды колебаний по длине стержня с координатой x ; S — площадь поперечного сечения стержня; J — момент инерции поперечного сечения стержня. Решение уравнения (4) имеет вид:

$$y(x) = A \sin kx + B \cos kx + C \operatorname{sh} kx + D \operatorname{ch} kx, \quad (5)$$

где коэффициенты A, B, C, D определяются из граничных условий.

Граничные условия определяются следующим образом. Предположим, что стержень круглого сечения с радиусом r и длиной L закреплен в точке $x = 0$, а второй конец стержня с координатой $x = L$ свободен. В момент времени $t = 0$ на закрепленный конец стержня ($x = 0$) действует внешняя поперечная сила, в результате чего возникает смещение конца стержня по оси y на величину y_0 . Считаем при этом, что кривизна изгиба:

$$\left. \frac{\partial y(x)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0.$$

Дифференцируя выражение (5) и подставляя координату $x = 0$, получаем два граничных условия:

$$y(0) = B + D = y_0, \quad (6)$$

$$y'(0) = A + C = 0. \quad (7)$$

Известно также, что изгибный момент $M(x)$ стержня определяется следующим соотношением [4]:

$$M(x) = EJ \frac{\partial^2 y(x)}{\partial x^2},$$

а поперечная сила:

$$F(x) = EJ \frac{\partial^3 y(x)}{\partial x^3}.$$

Поскольку второй конец стержня с координатой $x = L$ свободный, то $M(L) = 0$ и $F(L) = 0$. Дифференцируя выражение (5) и подставляя координату $x = L$, получаем еще два граничных условия:

$$M(L) = E \times J (Ak^2 \sin kL - Bk^2 \cos kL + Ck^2 \operatorname{sh} kL + Dk^2 \operatorname{ch} kL) = 0, \quad (8)$$

$$F(L) = E \times J (Ak^3 \cos kL - Bk^3 \sin kL + Ck^3 \operatorname{ch} kL + Dk^3 \operatorname{sh} kL) = 0. \quad (9)$$

Учитывая первые два граничных условия (6) и (7) и соотношения (8) и (9), получаем:

$$A = \frac{-B(\cos kL + \operatorname{ch} kL) + Y_0 \operatorname{ch} kL}{\sin kL + \operatorname{sh} kL}, \quad (10)$$

$$B = \frac{A(\cos kL + \operatorname{ch} kL) - Y_0 \operatorname{sh} kL}{\sin kL - \operatorname{sh} kL}. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (10) и производя несложные преобразования, находим значение для коэффициента A :

$$A = \frac{Y_0}{2} \left(\frac{\operatorname{sh} kL \cos kL + \operatorname{ch} kL \sin kL}{1 + \cos kL \operatorname{ch} kL} \right). \quad (12)$$

Скорость колебаний по координате Y можно представить как $v(x) = j\omega y(x)$. Входной импеданс механической системы можно определить, используя метод электромеханических аналогий [6]: механическая скорость — электрический ток и механическая сила — электрическое напряжение. Тогда входной импеданс механической системы определяется по следующей формуле:

$$Z(0) = \frac{F(0)}{V(0)} = \frac{EJk^3(C-A)}{j\omega Y_0} = j \frac{2Ak^3 EJ}{\omega Y}. \quad (13)$$

Подставляя значение коэффициента A из (12) в (13), получаем соотношение для входного импеданса:

$$Z(0) = j \frac{EJk^3 (\operatorname{sh} kL \cos kL + \operatorname{ch} kL \sin kL)}{\omega (1 + \cos kL \operatorname{ch} kL)} = j \frac{EJk^3 \operatorname{sh} kL \cos kL + \operatorname{ch} kL \sin kL}{\omega (1 + \cos kL \operatorname{ch} kL)}. \quad (14)$$

Таким образом, входной импеданс инструмента можно определить суммой значений импеданса двух консольных частей микроинструмента A и C [7]:

$$Z(0) = Z(A) + Z(C).$$

Учитывая (14), получаем соотношение для входного импеданса микроинструмента:

$$Z(0) = j \frac{EJk^3}{\omega} \left(\frac{\operatorname{sh} kA \cos kA + \operatorname{ch} kA \sin kA}{1 + \cos kA \operatorname{ch} kA} + \frac{\operatorname{sh} kC \cos kC + \operatorname{ch} kC \sin kC}{1 + \cos kC \operatorname{ch} kC} \right). \quad (15)$$

Пример графического построения входного импеданса $Z(C)$ показан на рис. 6. Точки перехода через ноль являются оптимальным положением инструмента.

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 (рис. 7). Его принцип работы основан на контроле сигнала фотоприемника лазерного полупроводникового излучателя, луч которого наполовину перекрывается телом рабочего инструмента. В стенде применен метод прямого контроля амплитуды механических колебаний, в отличие от сложных доплеровских интерферометров, измеряющих скорость колебаний и математически пересчитывающих в амплитуду. Дополнительным преимуще-

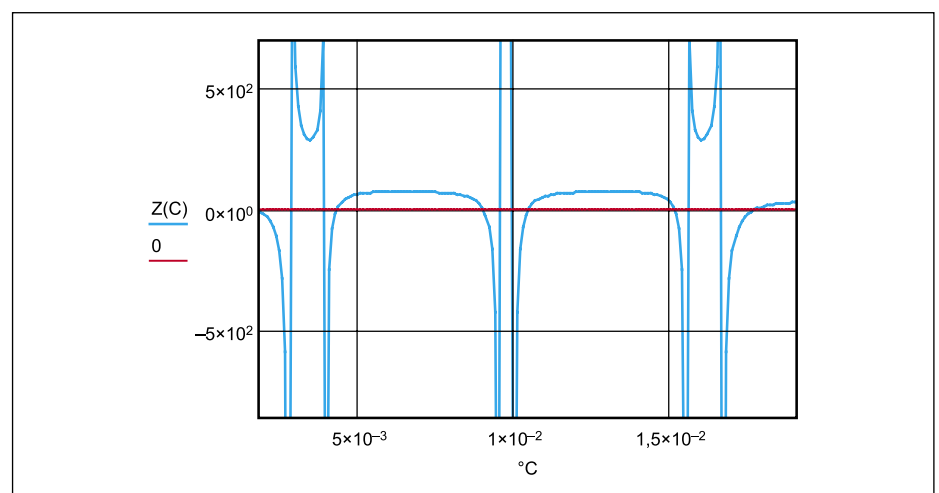


Рис. 6. Зависимость входного импеданса инструмента от вылета рабочего инструмента C на частоте 94,3 кГц



Рис. 7. Стенд контроля колебаний СКК-01

ством метода является его нечувствительность к отражающим свойствам поверхности инструмента.

В рабочем режиме вибрация рабочего инструмента изменяет интенсивность лазерного луча, а фотоприемник регистрирует колебания УЗ-частоты. Поскольку амплитуда колебаний достаточно мала (0,1–1 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. С помощью АЦП и микроконтроллера пиковое значение амплитуды выводится на ЖК-дисплей (рис. 8). Синусоидальный сигнал УЗ-колебаний после низкочастотного фильтра может быть выведен на осциллограф для наблюдения формы и амплитуды.

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 распределение амплитуды колебаний вдоль оси инструмента. Распределение амплитуды исследовалось



Рис. 8. LCD-дисплей блока контроля станда

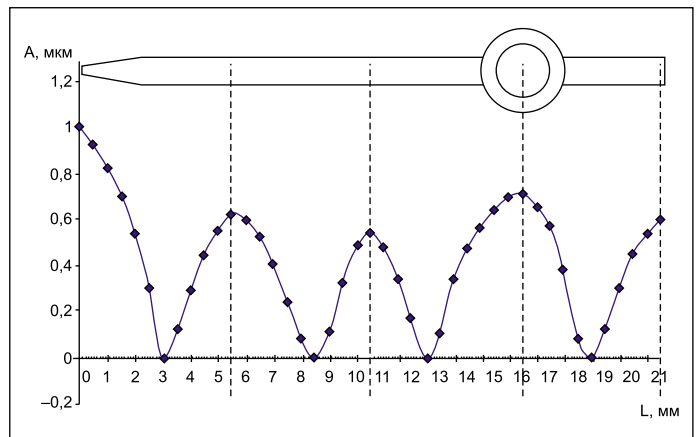


Рис. 9. Распределение амплитуды колебаний вдоль оси инструмента

на инструменте типа КУТ61-50-130-21 и УЗП с частотой резонанса 94 кГц. В инструменте на частоте резонанса 94 кГц возникает стоячая волна с четырьмя узловыми точками (рис. 9).

С помощью осциллографа фирмы Tektronix (модель TDS2024B) с полосой пропускания 200 МГц исследован спектр входных сигналов (рис. 10). При этом использовался метод быстрого преобразования Фурье при оптимальном согласовании инструмента с преобразователем и при рассогласовании. При рассогласовании инструмента с преобразователем, то есть при произвольном вылете инструмента, в спектре колебаний появляются гармоники (рис. 10б), расположенные в районе резонансной частоты, а выходной сигнал модулирован по амплитуде. Подобные гармоники возникают также при плохом прилегании поверхности инструмента к поверхности установочного отверстия ин-

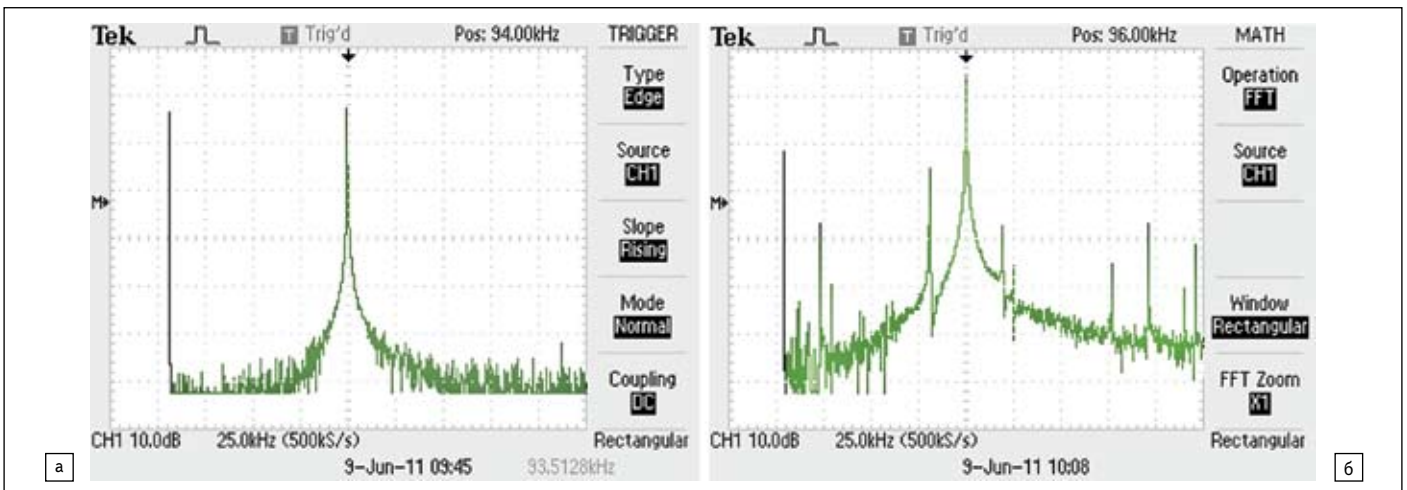


Рис. 10. Спектры колебаний торца инструмента при оптимальном согласовании и при рассогласовании

струмента в УЗП. На осциллограмме видно, что частота резонанса равна 96 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, его сопротивление на резонансной частоте и форме кривых модуля и фазы импеданса.

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.

Заключение

Оптимально такое положение инструмента в УЗС, при котором значения частоты резонанса без инструмента и с установленным инструментом совпадают, а импеданс минимален. Микроинструменты с длинами, разработанными для стандартного диапазона частот 66 ± 5 кГц, можно использовать в ультразвуковых системах повышенной частоты (>90 кГц). Предложенная методика контроля параметров УЗС-микросварки может быть полезна при разработке новых ультразвуковых систем и инструментов и оценки возможности их согласования в различных диапазонах частот. ■

Литература

1. Ramsey T. H., Alfaro C. High-Frequency Enhancement for Ambient Temperature Ball Bonding // Solid State Technology. Vol. 34. Dec. 1991.
2. Chylak B, Wei Qin I., Eder J. Achieve Optimal Wire Bonding Performance through Ultrasonic System Improvement // Semicon Singapore. 2004.
3. Силин Л. Л., Баландин Г. Ф., Коган М. Г. Ультразвуковая сварка. М.: Машгиз, 1962.
4. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. М.: Наука, 1967.
5. www.fkphysiktechnik.com/index_e.htm
6. Лепендин Л. Ф. Акустика. М.: Высшая школа, 1978.
7. Li X., Bilgutay N. M., McBrearty M., Prybella J. R. Simulation of an Ultrasonic Bonding Tool // IEEE 1985 Ultrasonics Symposium Proceedings. San Francisco, CA. 16–18 Oct. 1985.