

УДК 671.791.16

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СИСТЕМЫ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ МИКРОСВАРКИ ПРОВОЛОЧНЫХ ВЫВОДОВ

И.Б. ПЕТУХОВ

УП «КБТЭМ-СО» ГНПО «ПЛАНАР»
пр. Партизанский, 2, Минск, 220033, Беларусь

Поступила в редакцию 22 декабря 2011

Предложены математические выражения для резонансной частоты и импеданса ультразвукового преобразователя для микросварки проволочных выводов. Моделированием резонансной частоты и импеданса ультразвуковых преобразователей стандартной и повышенной частоты колебаний установлены оптимальные условия закрепления инструмента в ультразвуковой системе. Разработанная методика экспериментально подтверждена с помощью лазерного измерителя амплитуды колебаний.

Ключевые слова: ультразвуковая система, ультразвуковой преобразователь, волновод, ультразвуковая микросварка, проволочные выводы, микроинструмент, импеданс, частота резонанса.

Введение

Качественную работу любой установки присоединения проволочных выводов в изделиях электронной техники с использованием ультразвука определяет ее ультразвуковая система (УЗС), включающая ультразвуковой преобразователь (УЗП) с установленным рабочим инструментом и ультразвуковой генератор (УЗГ). Рост требований к производительности оборудования и уменьшения размеров контактных площадок на кристаллах интегральных схем требуют прецизионной работы УЗС, поскольку подводимые электрические колебания от УЗГ преобразуются ультразвуковым преобразователем в механические колебания на частоте резонанса УЗП. В свою очередь, требуется 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. Поэтому для поддержания частоты резонанса все современные УЗГ содержат встроенную фазовую автоподстройку частоты (ФАПЧ) и устройства компенсации изменения входного импеданса.

Для корректной установки рабочего микроинструмента ведущие производители оборудования микросварки проволочных выводов прилагают к поставляемому оборудованию специальные механические шаблоны. Для разработки подобных шаблонов используют различные измерители (акустические микрофоны, емкостные сенсоры или лазерные интерферометры) для исследования распределения колебаний вдоль оси рабочего микроинструмента. Для стандартного диапазона ультразвуковых частот 66 ± 5 кГц разработана широкая номенклатура рабочих инструментов с различной длиной и геометрией рабочего торца [1, 2].

С середины 90-х годов в зарубежной электронной промышленности активно используются ультразвуковые системы в диапазоне повышенных частот 90–140 кГц. Многие публикации, например [3, 4], показывают преимущества в использовании ультразвуковых систем повышенной частоты для процессов проволочного монтажа микрочипов на подложки.

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

Целью данной работы является разработка методики расчета резонансной длины рабочего инструмента и определение его оптимального положения в УЗС на стандартных и повышенных частотах.

Анализ колебаний сварочного микроинструмента

Конструкция УЗС состоит из следующих составных частей (рис. 1): пьезоэлектрического вибратора 1, состоящего из 4-х или 6-ти пьезокерамических колец, стянутых между собой шпилькой с металлическими накладками; цилиндрического держателя (стакана) 2, закрепленного в узле волновода 3 и предназначенного для крепления УЗП в сварочной головке установки. На конце волновода 3 закреплен микроинструмент 4 с помощью торцевого зажима. Сечение волновода обычно уменьшается к месту крепления микроинструмента, чем достигается необходимый коэффициент усиления механических колебаний.

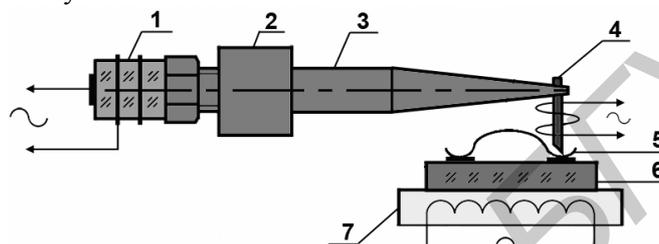


Рис. 1. Схема технологической системы микросварки: 1 – пьезоэлектрический вибратор, 2 – крепежный стакан, 3 – волновод, 4 – микроинструмент, 5 – проволочный вывод, 6 – кристалл, 7 – подогреваемый столик

Пьезоэлектрический вибратор 1 преобразует подводимое переменное напряжение от ультразвукового генератора в продольные механические колебания на основе обратного пьезоэффекта. Резонансная частота пьезоэлектрического вибратора зависит от электромеханических свойств используемой пьезокерамики, размеров и материалов металлических накладок. С помощью резьбовой шпильки пьезоэлектрический вибратор 1 и волновод 3 соединяются между собой. Геометрические размеры волновода 3 рассчитываются на частоту механических колебаний пьезоэлектрического вибратора. Таким образом, УЗП представляет собой резонансную электромеханическую систему. Согласно [5] необходимо, чтобы резонансная частота колебаний УЗП и колебаний микроинструмента 4 совпадали. В противном случае, при установке микроинструмента 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 в конечном счете снизить качество образуемых соединений.

Известно, что продольные упругие колебания в твердом теле описываются дифференциальным уравнением второго порядка [6], а изгибные колебания – дифференциальным уравнением четвертого порядка. В технологической системе микросварки происходят два вида преобразований. Пьезоэлектрический вибратор преобразует подводимые электрические колебания в продольные механические колебания, распространяемые по волноводу к месту крепления микроинструмента. В микроинструменте, закрепленном в торце волновода перпендикулярно распространению продольных волн, возникают поперечные (изгибные) механические колебания, которые передаются в зону сварки. Задача состоит в том, чтобы частота изгибных колебаний микроинструмента совпадала с частотой продольных колебаний УЗП. Из теории изгибных колебаний [6] известно, что уравнение колебаний стержня, закрепленного с одного торца, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^4 y(x)}{\partial x^4} - \frac{\omega^2 \cdot \rho \cdot S}{E \cdot J} y(x) = 0, \quad (1)$$

где $y(x)$ – функция распределения амплитуды колебаний по длине стержня с координатой x , ω – круговая частота колебаний, ρ – плотность, S – площадь поперечного сечения стержня,

E – модуль Юнга, J – момент инерции поперечного сечения стержня. Общее решение уравнения (1) может быть представлено в следующем виде:

$$y(x) = A \sin kx + B \cos kx + C \operatorname{sh} kx + D \operatorname{ch} kx, \quad (2)$$

где коэффициенты A, B, C и D определяются из граничных условий, а $k = \left(\frac{\omega^2 \cdot \rho \cdot S}{E \cdot J} \right)^{\frac{1}{4}}$.

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 ($x = 0$) воздействует 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 (2) и подставляя координату $x = 0$, получаем два граничных условия:

$$y(0) = B + D = y_0, \quad (3)$$

$$y'(0) = A + C = 0. \quad (4)$$

Известно также из [6], что изгибной момент $M(x)$ стержня определяется следующим соотношением: $M(x) = E \cdot J \cdot \frac{\partial^2 y(x)}{\partial x^2}$, а поперечная сила $F(x) = E \cdot J \cdot \frac{\partial^3 y(x)}{\partial x^3}$. Поскольку второй конец стержня с координатой $x = L$ свободный, то $M(L) = 0$ и $F(L) = 0$. Дифференцируя выражение (2) и подставляя координату $x = L$, получаем еще два граничных условия:

$$M(L) = E \cdot J (-Ak^2 \sin kL - Bk^2 \cos kL + Ck^2 \operatorname{sh} kL + Dk^2 \operatorname{ch} kL) = 0, \quad (5)$$

$$F(L) = E \cdot J (-Ak^3 \cos kL + Bk^3 \sin kL + Ck^3 \operatorname{ch} kL + Dk^3 \operatorname{sh} kL) = 0. \quad (6)$$

Учитывая первые два граничных условия (3) и (4) и соотношения (5) и (6), получаем:

$$A = \frac{-B(\cos kL + \operatorname{ch} kL) + Y_0 \operatorname{ch} kL}{\sin kL + \operatorname{sh} kL}. \quad (7)$$

$$B = \frac{A(\cos kL + \operatorname{ch} kL) - Y_0 \operatorname{sh} kL}{\sin kL - \operatorname{sh} kL}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (7) и производя несложные преобразования, находим значение для коэффициента A :

$$A = \frac{Y_0}{2} \left(\frac{\operatorname{sh} kL \cdot \cos kL + \operatorname{ch} kL \cdot \sin kL}{1 + \cos kL \cdot \operatorname{ch} kL} \right) \quad (9)$$

Скорость колебаний по координате Y можно представить как $v(x) = j \cdot \omega \cdot y(x)$. Входной импеданс механической системы можно определить, используя метод электромеханических аналогий [7], механическая скорость – электрический ток и механическая сила – электрическое напряжение. Тогда входной импеданс механической системы определяется по следующей формуле:

$$Z(0) = \frac{F(0)}{V(0)} = \frac{EJk^3(C-A)}{j\omega Y_0} = j \frac{2Ak^3EJ}{\omega Y_0}. \quad (10)$$

Подставляя значение коэффициента A из (9) в (10), получаем соотношение для входного импеданса:

$$Z(0) = j \frac{EJk^3(\operatorname{sh} kL \cdot \cos kL + \operatorname{ch} kL \cdot \sin kL)}{\omega(1 + \cos kL \cdot \operatorname{ch} kL)} = j \frac{EJk^3}{\omega} \cdot \frac{\operatorname{sh} kL \cdot \cos kL + \operatorname{ch} kL \cdot \sin kL}{1 + \cos kL \cdot \operatorname{ch} kL}. \quad (11)$$

Микроинструмент, установленный в волноводе УЗП системы микросварки, показан на рис. 2:

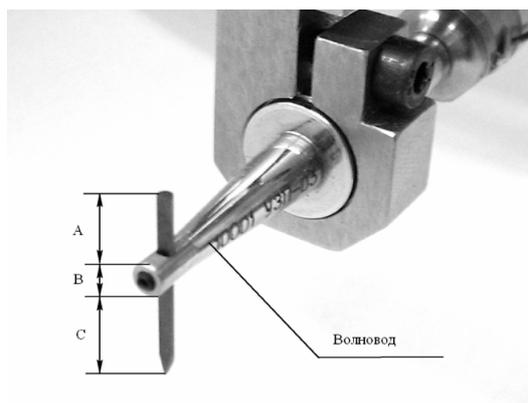


Рис. 2. Микроинструмент, установленный в волноводе: A – часть инструмента над волноводом, B – диаметр торца волновода и C – рабочий вылет микроинструмента

Таким образом, входной импеданс инструмента можно определить суммой импедансов двух консольных частей микроинструмента A и C [8]:

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

Учитывая (11), получаем общий вид соотношения для входного импеданса микроинструмента:

$$Z(0) = j \frac{EJk^3}{\omega} \cdot \left(\frac{\operatorname{sh}kA \cdot \operatorname{cos}kA + \operatorname{ch}kA \cdot \operatorname{sin}kA}{1 + \operatorname{cos}kA \cdot \operatorname{ch}kA} + \frac{\operatorname{sh}kC \cdot \operatorname{cos}kC + \operatorname{ch}kC \cdot \operatorname{sin}kC}{1 + \operatorname{cos}kC \cdot \operatorname{ch}kC} \right). \quad (12)$$

Моделирование и анализ экспериментальных данных

Среди многообразия инструментов для микросварки, для моделирования и экспериментальных работ выбран инструмент из карбида вольфрама длиной 21 мм и диаметром 1,6 мм как наиболее востребованный для микросварки проволоки диаметром в диапазоне 18–75 мкм. Микросварка таких проводников требует тщательного подбора режимов микросварки и согласования ультразвуковой системы. Для получения экспериментальных данных в работе использовались два типа УЗП для клиновой микросварки: с частотой резонанса стандартного диапазона 65,75 кГц (рис. 3,а) и с повышенной частотой резонанса 94,3 кГц (рис. 3,б).



Рис. 3. Ультразвуковые преобразователи стандартной (а) и повышенной частоты (б)

Для моделирования зависимости входного импеданса микроинструмента необходимо вычислить коэффициент k , входящий в (12). Учитывая, что площадь поперечного сечения инструмента $S = \pi \cdot r^2$, где r – радиус, а момент инерции $J = \frac{\pi \cdot r^4}{4}$, соотношение для k можно преобразовать к следующему виду: $k = \left(\frac{\omega^2 \cdot \rho \cdot S}{E \cdot J} \right)^{1/4} = \left(\frac{4 \cdot \omega^2 \cdot \rho}{E \cdot r^2} \right)^{1/4}$, где ρ – плотность, E – модуль Юнга, r – радиус, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота. Для карбида вольфрама WC, используемого для производства микроинструментов, $E = 700 \cdot 10^9$ Па, а $\rho = 15800$ кг/м³. Рассчитаем параметр k для частот 65,75 и 94,3 кГц:

преобразовать к следующему виду: $k = \left(\frac{\omega^2 \cdot \rho \cdot S}{E \cdot J} \right)^{1/4} = \left(\frac{4 \cdot \omega^2 \cdot \rho}{E \cdot r^2} \right)^{1/4}$, где ρ – плотность, E – модуль Юнга, r – радиус, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота. Для карбида вольфрама WC, используемого для производства микроинструментов, $E = 700 \cdot 10^9$ Па, а $\rho = 15800$ кг/м³. Рассчитаем параметр k для частот 65,75 и 94,3 кГц:

$$k_1 = \left(\frac{4(2\pi \cdot 65750)^2 \cdot 15800}{700 \cdot 10^9 \cdot 0,0008^2} \right)^{1/4} = 393,91 \text{ для частоты } 65,75 \text{ кГц,}$$

$$k_2 = \left(\frac{4(2\pi \cdot 94300)^2 \cdot 15800}{700 \cdot 10^9 \cdot 0,0008^2} \right)^{1/4} = 471,74 \text{ для частоты } 94,3 \text{ кГц.}$$

Из рис. 2 следует, что длина части инструмента над волноводом равна $A = L - B - C$, где L – длина инструмента, равная 0,021 м. Для преобразователей, показанных на рис. 3, размер торца волновода равен 0,0034 м. Подставляя значение A в (12), получаем функцию $Z(C)$ от одной переменной C . Поскольку импеданс из выражения (12) является комплексной величиной, то на частоте резонанса он равен нулю. По графической зависимости импеданса от рабочего вылета $Z(C)$ можно найти точки нулевого импеданса и тем самым определить оптимальный вылет инструмента. Учитывая сложность выражения (12), моделирование удобно проводить в математическом пакете Mathcad. Результаты моделирования на частоте 65,75 кГц показаны на рис. 4,а, а на частоте 94,3 кГц – на рис. 4,б.

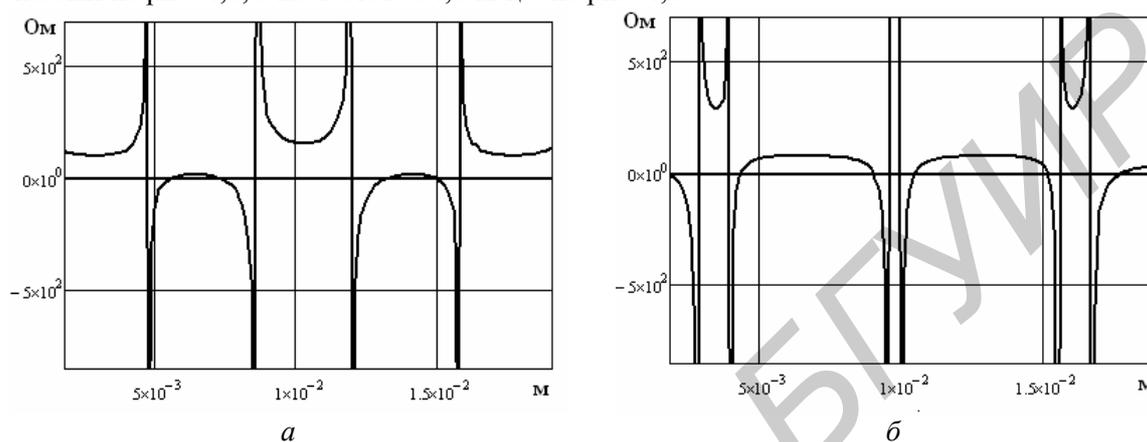


Рис. 4. Зависимости входного импеданса инструмента от вылета рабочего инструмента C на частотах 65,75 (а) и 94,3 (б) кГц

На рис. 5 и 6 представлены экспериментальные данные зависимости частоты резонанса УЗП повышенной и стандартной частоты от положения микроинструмента в волновод. Контроль механических колебаний микроинструмента, измерения импеданса и частоты проводились на разработанном стенде контроля колебаний СКК-01 с использованием полупроводникового лазера [9].

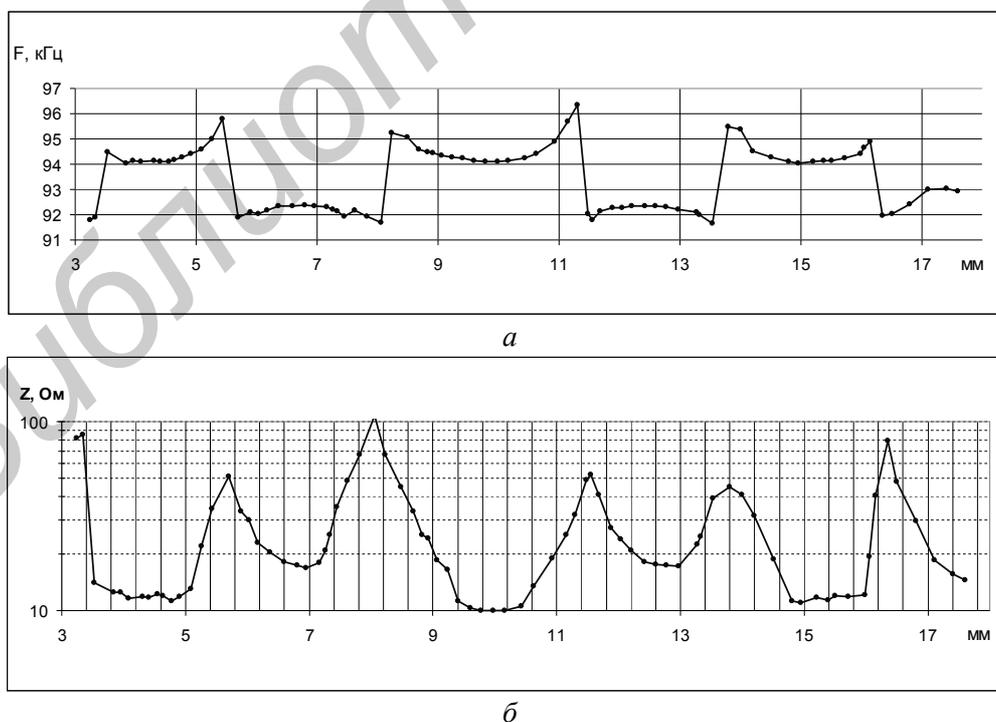


Рис. 5. Зависимость частоты резонанса УЗП от вылета рабочего инструмента (а) и импеданса (б). Частота резонанса УЗП без инструмента 94,3 кГц

Из выражения (12) следует, что частота, импеданс и вылет инструмента являются взаимосвязанными параметрами УЗС. Из рис. 5,а видно, что при вылете инструмента 4, 10 и 15 мм частота резонанса УЗП равна исходной резонансной частоте УЗП без инструмента (94,3 кГц). При этих же значениях вылета инструмента наблюдается минимальное значение импеданса в пределах 10–11 Ом (рис. 5,б). Таким образом, результаты моделирования значения вылета инструмента C при входном импедансе, равном нулю, практически совпадают с экспериментальными значениями. Аналогичные экспериментальные зависимости для УЗП с частотой резонанса 63,75 кГц показаны на рис 6. Из рис. 6,б видно, что оптимальный вылет инструмента равен 13 мм, что совпадает с результатами моделирования.

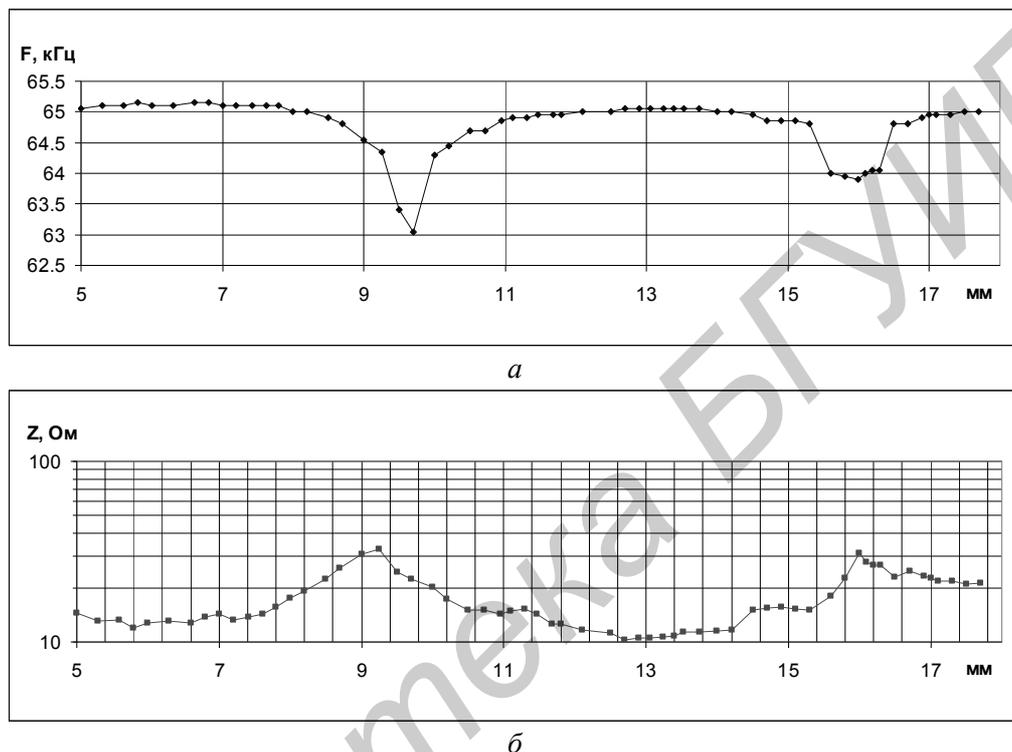


Рис. 6. Зависимость частоты резонанса УЗП от вылета рабочего инструмента (а) и импеданса (б). Частота резонанса УЗП без инструмента 65,75 кГц

Выводы

Предложены математические выражения для резонансной частоты и импеданса ультразвукового преобразователя для микросварки проволочных выводов. Моделированием резонансной частоты и импеданса ультразвуковых преобразователей стандартной и повышенной частоты колебаний установлены оптимальные условия закрепления инструмента в УЗ системе, при которых частота УЗП без инструмента и с установленным инструментом совпадает, а импеданс минимален.

Предложенная методика моделирования позволяет использовать микроинструменты стандартного диапазона частот 66 ± 5 кГц в УЗ системах повышенной частоты (> 90 кГц) и может оказать помощь при разработке новых УЗ систем и инструментов для оценки возможности согласования в различном диапазоне частот.

PARAMETERS OPTIMIZATION OF HIGH FREQUENCY ULTRASONIC SYSTEM FOR WIRE BONDING

I.B. PETUHOV

Abstract

Mathematical equations for resonant frequency and impedance of ultrasonic transducer for wire bonding were proposed. Clamping optimization of bonding tool was determined due to modeling of resonant frequency and impedance for standard and high frequency ultrasonic vibrations in ultrasonic system. It was shown that proposed technique gives good fit to the experimental data.

Список литературы

1. *Сухов В.* // Технологии в электронной промышленности. 2011. №8. С. 50–52.
2. Wedge bonding tools catalog //www.smallprecisiontools.com/products/catalog.
3. *Ramsey T.H., Alfaro C.* // Solid State Technology. 1991. Vol. 34, P. 37–38.
4. *Chylak B., Wei Qin I., Eder J.* // Semicon Singapore 2004. P.1–7
5. *Силин Л.Л., Баландин Г.Ф., Коган М.Г.* Ультразвуковая сварка. М.,1962.
6. *Тимошенко С.П.* Колебания в инженерном деле. М.,1967.
7. *Лепендин Л.Ф.* Акустика. М., 1978.
8. *Li X., Bilgutay N.M., McBrearty M. et al.* // EEE 1985 Ultrasonics symposium. San Francisco. CA, 16–18 Oct. 1985. P. 567–571.
9. *Ланин В., Петухов И., Федоров Н.* // Технологии в электронной промышленности. 2011. № 6. С. 66–70.