

# ЛАЗЕРНАЯ ВИБРОМЕТРИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИСТЕМ МИКРОСВАРКИ

Петухов Игорь ,

Ланин Владимир,

Шепелевич Александр

Для создания микросварных соединений высокой плотности в ультразвуковых системах микросварки актуально применение ультразвуковых преобразователей (УЗП) повышенной частоты с частотой резонанса более 100 кГц, что позволяет повысить производительность за счёт сокращения времени сварки, а также уменьшить температуру зоны микросварки. Однако такие УЗП характеризуются малыми амплитудами колебаний и повышенной чувствительностью к изменению нагрузки. Предложена методика бесконтактного измерения амплитуды механических УЗ колебаний в системах УЗ микросварки с использованием лазерного виброметра.

## Введение

Современное развитие микроэлектроники сопровождается увеличением степени интеграции, качества и надежности изделий электроники. С повышением степени интеграции растет плотность межсоединений между кристаллом и корпусом, уменьшаются размеры контактных площадок и расстояния между ними. Термозвуковая микросварка «шарик-клин» в настоящее время является самым быстродействующим процессом присоединения проволочных выводов к контактным площадкам интегральных схем и обеспечивает высокую плотность соединений. До 95 % изготавливаемых микросхем в мире используют золотую проволоку для обеспечения надёжных межсоединений между кристаллом и выводной рамкой [1]. Быстрое развитие технологии сверхбольших интегральных схем и уменьшение размеров контактных площадок потребовало использование проводников диаметром 18 мкм и менее, а также высокой воспроизводимости образуемых шариков [2].

Прогрессирующая микроминиатюризация электронных компонентов и создание функционально-сложных микроэлектронных устройств высокой степени интеграции, в частности 3D-интегральных микросхем и многокристальных модулей, выявили ряд проблем при формировании микросварных соединений. При микросварке данных изделий крайне важно обеспечение большого числа (от 100 до 1000) надёжных проволочных межсоединений с учетом разновысотности уровней между компонентами и малых размеров контактных площадок активных структур. При формировании микросварных соединений высокой плотности раз-

меры контактных площадок на кристалле снижаются до  $55 \times 55$  мкм с шагом между ними 20–30 мкм. Столь малые размеры приводят к необходимости использовать проволоку малого диаметра (17–20 мкм), что предъявляет особые требования к настройке параметров УЗ колебательных систем [3].

Уменьшение размеров контактных площадок на кристаллах интегральных схем требует прецизионной работы УЗ систем микросварки. Для этого требуется точный контроль параметров УЗ систем и оптимальное согласование рабочего инструмента с УЗП. Сложность согласования заключается в том, что УЗП с инструментом представляет собой электромеханическую резонансную систему, параметры которой (частота и входной импеданс) изменяются в процессе работы, например, при изменении статического усилия на УЗП.

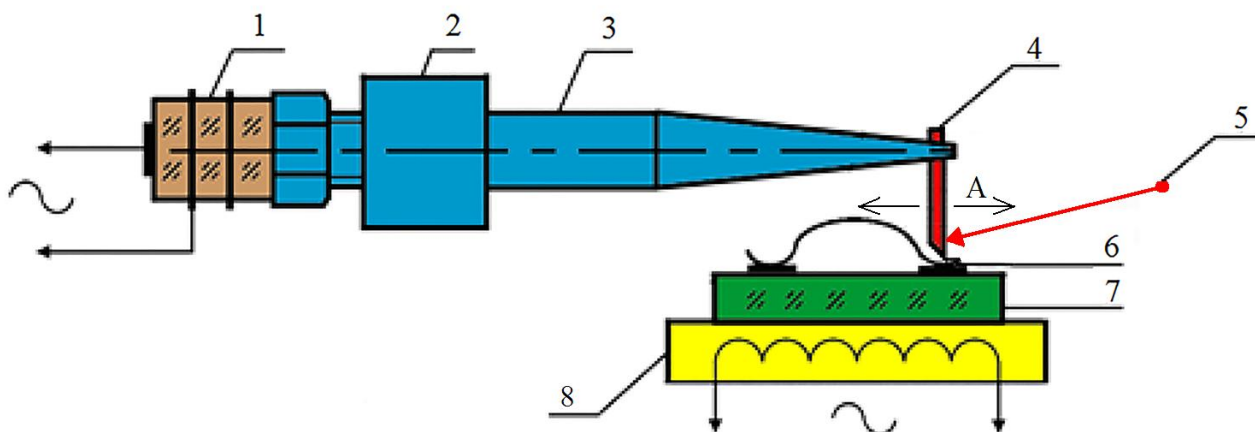
При настройке УЗ систем микросварки важна корректное закрепление микроинструмента в торце волновода УЗП – так называемый «вылет» инструмента. Необходимо, чтобы собственные частоты продольных колебаний УЗП и изгибных колебаний инструмента совпадали. В противном случае это может привести к рассогласованию преобразователя с инструментом и снижению амплитуды колебаний на рабочем торце инструмента. При сборке изделий с повышенной плотностью монтажа с шагом межсоединений 50–60 мкм используется капилляр с утонённым торцом [4]. Передача УЗ колебаний от места закрепления такого капилляра в волноводе к его торцу имеет ряд особенностей и требует специального оборудования для согласования системы «УЗП-капилляр».

Для бесконтактных вибрационных измерений на поверхности объекта контроля используются лазерные доплеровские вибromетры (ЛДВ), которые являются современным высокоточным научным инструментом. Сканирующие лазерные вибromетры успешно применяются для измерения скоростей движения частиц в фокусированных УЗ полях [5]. Лазерный луч от ЛДВ направляется на поверхности объекта, а амплитуда и частота колебаний извлекаются из доплеровского сдвига частоты отраженного лазерного луча вследствие вибрации поверхности. Выход ЛДВ, как правило, представляет собой непрерывное аналоговое напряжение, которое прямо пропорционально компоненту целевой скорости вдоль направления лазерного луча. Важными преимуществами ЛДВ по сравнению с контактными измерительными устройствами, такими как акселерометр, заключаются в том, что лазерный луч может быть направлен на объекты, которые труднодоступны, или которые слишком малы или слишком горячи, чтобы прикрепить физический преобразователь. Кроме того, ЛДВ производит измерение вибрации без силового нагружения объекта, что особенно важно для УЗ колебательных систем с малой амплитудой колебаний, а также микроэлектромеханических устройств.

## Методика измерения вибраций в ультразвуковых системах микросварки

Качественную работу любой установки присоединения выводов в изделиях электронной техники с использованием ультразвука определяет ее УЗ система, включающая УЗП и ультразвуковой генератор (УЗГ). Рост требований к производительности оборудования и уменьшения 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 требуется согласование рабочего микроинструмента с УЗП.

Конструкция УЗ технологической системы микросварки состоит из следующих составных частей (рис. 1): пьезоэлектрического вибратора 1, состоящего из 4-х или 6-ти пьезо-керамических колец, стянутых между собой шпилькой с металлическими накладками; цилиндрического держателя (стакана) 2, закрепленного в узле волновода 3 и предназначенного для крепления УЗ системы в сварочной головке установки. На конце волновода закреплен инструмент 4 с помощью торцевого зажима. Сечение волновода уменьшается к месту крепления инструмента, чем достигается необходимый коэффициент усиления механических колебаний. Лазерный луч направляют на инструмент, рассеянный свет от объекта собирают вместе с опорным лучом на фотодетекторе.



**Рис. 1.** Схема УЗ системы микросварки: 1 – УЗ преобразователь, 2 – держатель, 3 – волновод, 4 – инструмент, 5 – лазерный луч, 6 – микропроводник, 7 – кристалл, 8 – стол

Электрические параметры УЗП представляются обычно круговой диаграммой проводимости, из которой легко вычислить параметры эквивалентной электрической схемы [6]. Пример амплитудно-частотной характеристики (АЧХ – красная линия на рисунке 2b) и круговой диаграммы для УЗП резонансной частоты 113,5 кГц представлен на рис. 2. Расчётные

данные УЗП отображены ниже графика АЧХ. Синяя кривая на рисунке 2*b* является фазовой характеристикой УЗП. Характеристики получены с использованием анализатора импеданса типа PV80A. Основными данными УЗП являются резонансная частота  $F_s$  (113,5 кГц), импеданс на резонансной частоте  $R_1$  (21,6 Ом), добротность  $Q_M$  (898,9), коэффициент электро-механического сцепления  $KEFF$  (0,22) и статическая емкость  $C_0$  (1,69 нФ).

Требования к инструменту для УЗ микросварки с точки зрения надежности соединений состоят в следующем [7]:

- форма и размеры инструмента должны обеспечивать эффективную передачу энергии УЗ колебаний;
- материал инструмента должен создавать минимальное затухание УЗ колебаний и не должен взаимодействовать с материалами проводников.

Лазерный виброметр (ЛВ) представляет собой двухлучевой лазерный интерферометр, который измеряет разность частот между опорным лучом и контрольным лучом [8]. Наиболее распространенным типом лазера в ЛВ является гелий-неоновый лазер, однако используются лазерные диоды, волоконные лазеры и Nd-YAG лазеры. Большинство коммерческих виброметров работают в гетеродине посредством добавления частотного сдвига (30–40 МГц) к одному из лучей. Этот сдвиг частоты генерируется ячейкой Брэгга или акустооптическим модулятором.

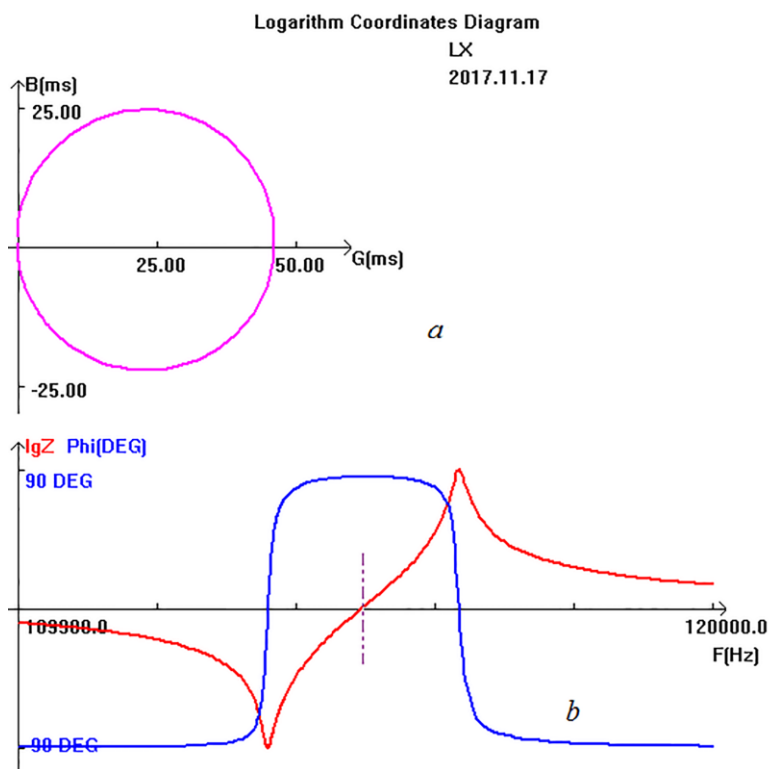


Рис. 2. Круговая диаграмма проводимости (a) и АЧХ УЗП (b)

На рис. 3 показана схема лазерного виброметра. Пучок от лазера, который имеет частоту  $f_0$ , делится на опорный пучок и контрольный луч светоделителем. Затем тестовый пучок проходит через ячейку Брэгга, что добавляет сдвиг частоты  $f_b$ . Этот сдвинутый по частоте пучок направляется к объекту. Движение мишени добавляет доплеровский сдвиг к лучу, заданный  $f_d = 2 v(t) \cdot \cos(\alpha) / \lambda$ , где  $v(t)$  – скорость мишени как функция времени;  $\alpha$  – угол между лазерным лучом и вектором скорости;  $\lambda$  – длина волны излучения.

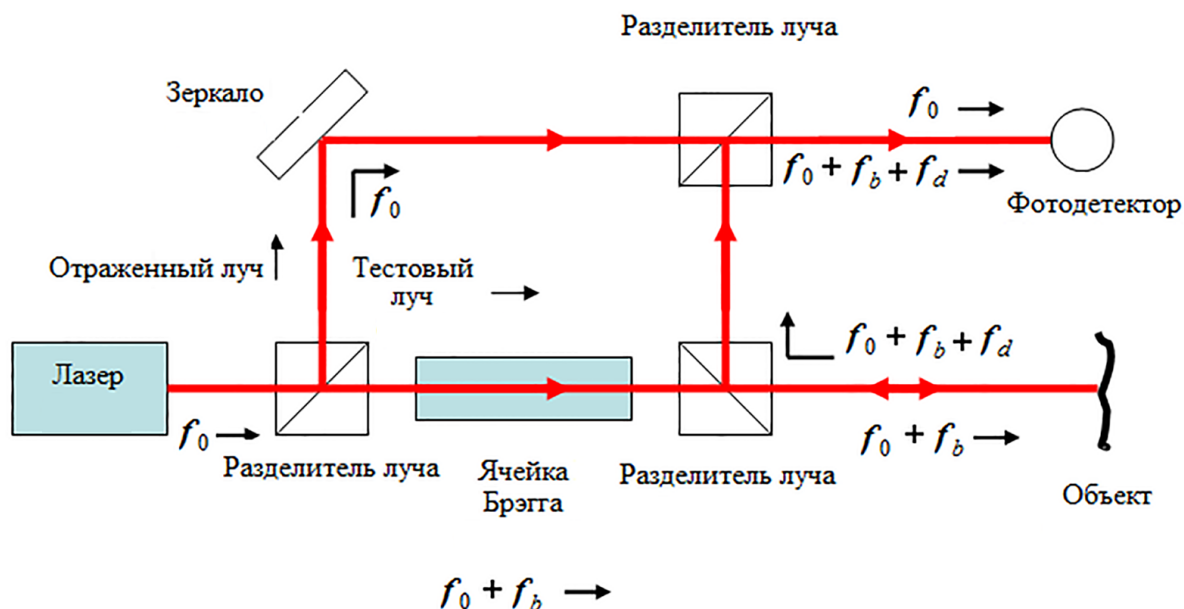
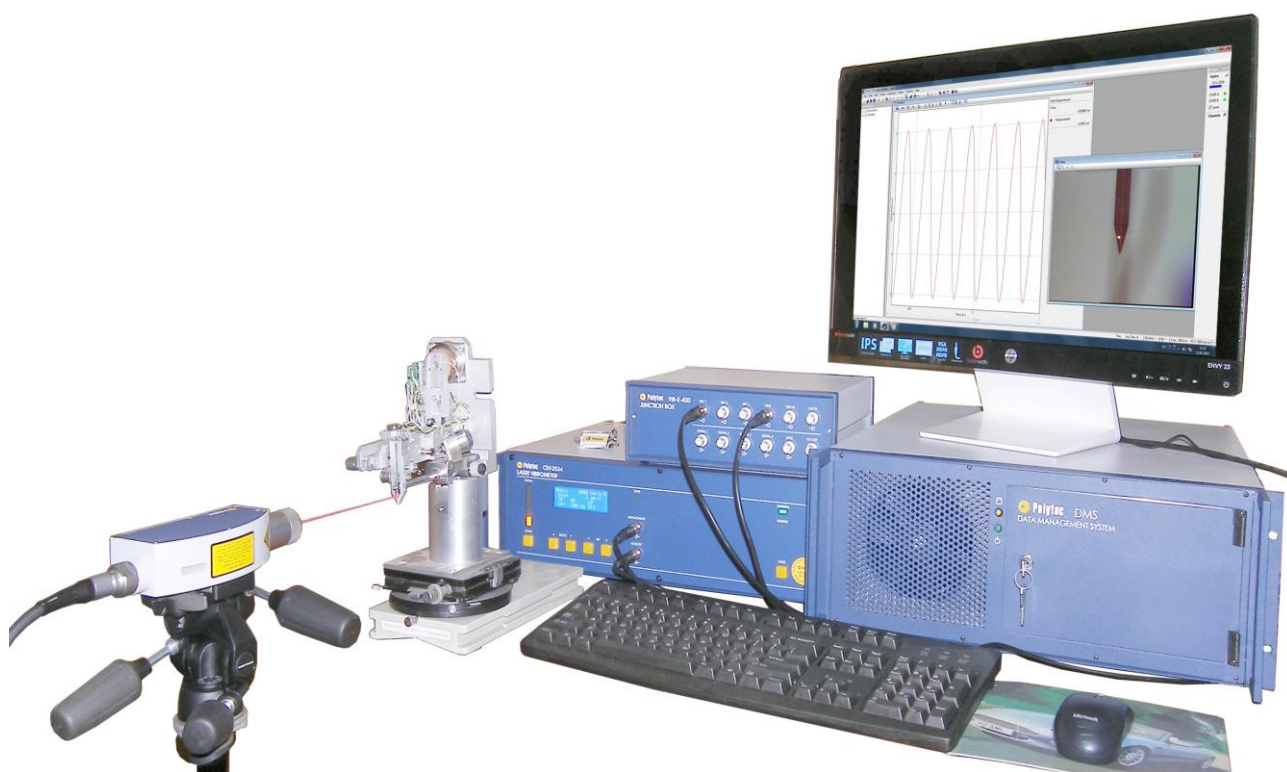


Рис. 3. Схема лазерного виброметра

Лазерный луч рассеивается от цели во всех направлениях, часть излучения собирается в ЛВ и отражается светоделителем на фотодетектор с частотой, равной  $f_0 + f_b + f_d$ . Этот рассеянный свет сочетается с эталонным лучом на фотодетекторе. Начальная частота лазера очень велика ( $> 10^{14}$  Гц), что выше, чем реакция детектора. Детектор реагирует на частоту биений между двумя пучками, которая находится на  $f_b + f_d$  (обычно в диапазоне десятков мегагерц). Выход фотоприемника является стандартным частотно-модулированным сигналом, с частотой ячейки Брэгга в качестве несущей частоты и доплеровским сдвигом в качестве частоты модуляции. Этот сигнал может быть демодулирован для получения скорости от времени вибрационной мишени.

Для исследования распределения амплитуды капилляра применен бесконтактный лазерный виброметр на основе контроллера CLV-2534 компании *Polytec* (рис. 4) [9]. Данный прибор является наиболее передовым средством для бесконтактных измерений, визуализации и анализа колебаний различных ультразвуковых и вибрационных систем. Ядром прибора является лазерный доплеровский виброметр – высокоточный оптический датчик для определения

виброскорости и амплитуды перемещения в заданной точке. Принцип работы виброметра основан на интерференции отражённого луча лазера от движущейся поверхности с опорным лучом. Результатом интерференции двух лучей является изменение интенсивности излучения, фиксируемого фотоприёмником. Это даёт возможность измерения частоты колебаний от 0 Гц до 250 кГц, виброскорости от 0,1 м/с до 20 м/с и амплитуды колебаний от 0,01 до 20 мкм. Особенностью данного виброметра является встроенная в сенсорную головку видеокамера, позволяющая совмещать сфокусированный луч лазера с точкой измерения на мониторе. Диаметр сфокусированного пятна луча не превышает 70–80 мкм, что позволяет легко совмещать луч с объектами малых размеров. С помощью подобного виброметра определяют не только распределение колебаний вдоль оси инструмента, перемещая капилляр вертикально относительно лазерного луча, но и исследуют спектр колебаний.

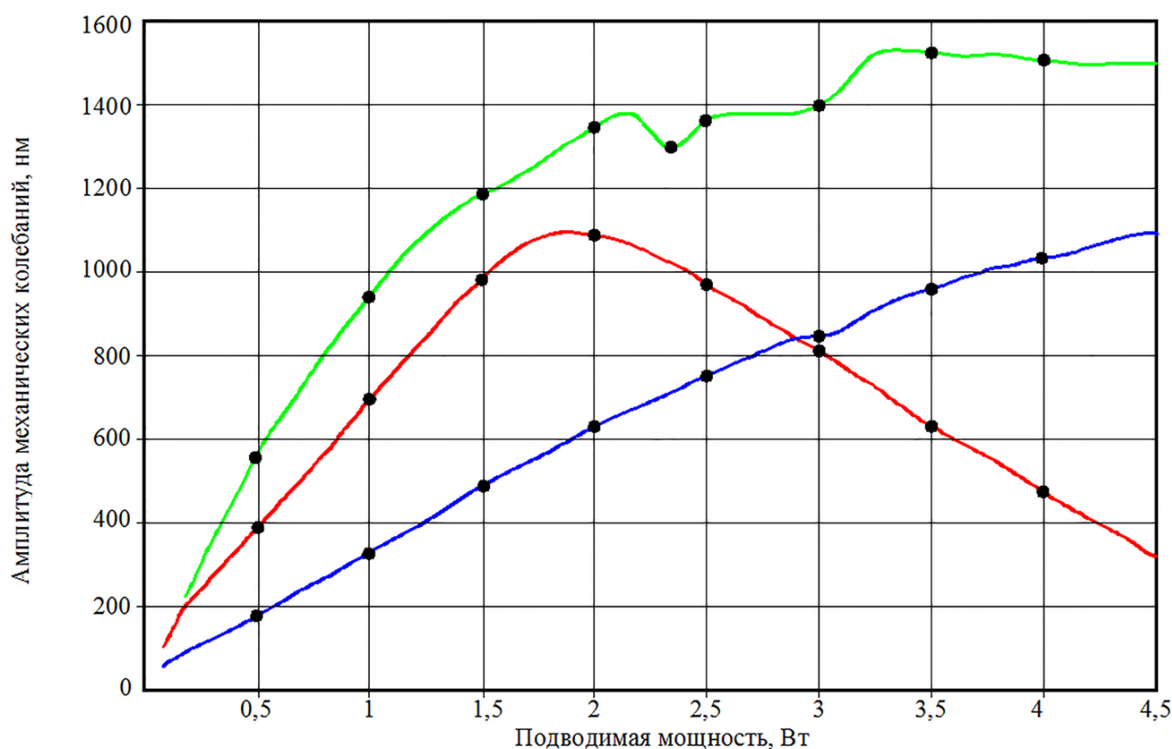


**Рис. 4.** Лазерный бесконтактный виброметр CLV-2534

### **Результаты измерений и их обсуждение**

Механические характеристики УЗП с резонансной частотой в диапазоне 60–120 кГц проверялись с использованием лазерного виброметра. Результаты измерения амплитуды механических колебаний торца капилляра в зависимости от подводимой мощности электрических колебаний приведены на рис. 5. Максимальная подводимая мощность по горизонталь-

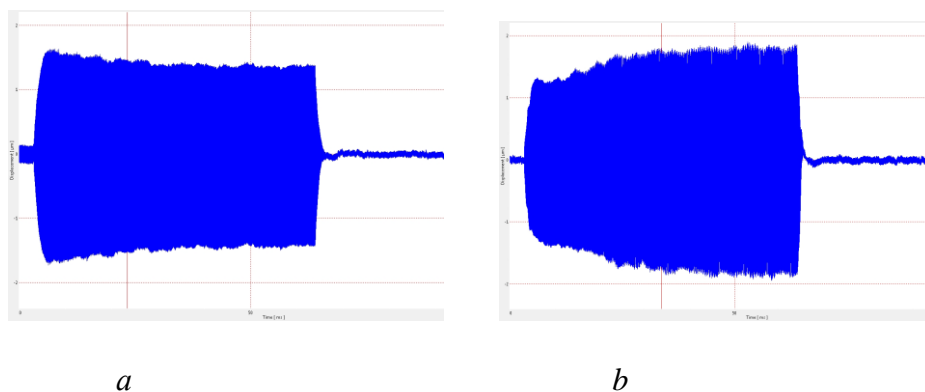
ной оси соответствует электрической мощности 4,5 Вт. Красная и синяя линии зависимостей относятся к УЗП с частотой резонанса 106 кГц при зажиме капилляра длиной 11 мм и 16 мм соответственно. Из рис. 5 видно, что на частоте 106 кГц капилляр длиной 11 мм плохо согласуется и имеет спадающую характеристику после достижения максимума, что может привести к труднообъяснимой интерпретации получаемых результатов: при увеличении мощности УЗГ деформация проводника уменьшается. При зажиме инструмента длиной 16 мм увеличение подводимой мощности приводит к адекватному увеличению амплитуды механических колебаний. Для УЗП с частотой резонанса 60 кГц характеристика близка к линейной зависимости, однако амплитуда колебаний капилляра выше, чем на частоте 106 кГц. Данные результаты показывают, что при замене микроинструмента необходима периодическая диагностика УЗ колебательной системы, а также при разработке новых УЗ систем повышенной частоты. Это позволяет оптимизировать конструкцию УЗП и осуществить точную настройку всей системы на резонансный режим работы.



**Рис. 5.** Зависимости амплитуды колебаний рабочего инструмента от приложенной мощности и частоты ультразвука: 1 – стандартный УЗП 60 кГц; 2 – несогласованный УЗП 106 кГц; 3 – согласованный УЗП 106 кГц

В процессе микросварки импеданс УЗП увеличивается, соответственно, в режиме стабилизации выходного напряжения УЗ генератора ток через УЗП будет уменьшаться [10]. При измерении амплитуды механических колебаний УЗ частоты во время микросварки волоочного вывода получено подтверждение связи величины протекающего электрического

тока через УЗП с амплитудой механических колебаний на инструменте (рис. 6а).



**Рис. 6 .** Амплитуда механических колебаний на торце капилляра в процессе микросварки: *a* – качественная сварка; *b* – отлип сварного соединения

Подъём амплитуды в процессе микросварки (рис. 6*b*) обычно свидетельствует о разрушении сварного соединения или срыве очагов взаимодействия свариваемых материалов, что приводит к снижению прочности соединения или его отказу.

## Заключение

Разработана методика бесконтактного измерения амплитуды механических УЗ колебаний в системах УЗ микросварки проволочных выводов высокой плотности с использованием лазерного виброметра. Лазерные методы контроля вибраций малых амплитуд необходимы для настройки УЗ систем микросварки в резонанс, при котором частоты УЗП без инструмента и с установленным инструментом совпадают между собой, а импеданс системы минимален. Для измерения амплитуды УЗ инструмента от 0,01 до 20 мкм в частотном диапазоне от 0 Гц до 250 кГц применен бесконтактный лазерный виброметр компании *Polytec*. Встроенная в сенсорную головку видеокамера позволила совместить сфокусированный луч лазера диаметром 70–80 мкм с капилляром и обеспечить высокую точность измерений.

В результате исследования распределения амплитуды УЗ колебаний вдоль капилляра с помощью лазерного виброметра установлены зависимости между мощностью, подводимой к УЗП, и амплитудой механических колебаний на частотах 60 и 106 кГц, используемых для микросварки проволочных выводов. При оптимальной длине капилляра 16 мм на частоте 106 кГц увеличение подводимой мощности до 4 Вт приводит к адекватному увеличению амплитуды механических колебаний до 1 мкм. Для УЗП с частотой резонанса 60 кГц характеристика близка к линейной зависимости, однако амплитуда колебаний капилляра достигает 1,5 мкм.

Лазерные системы виброметрии позволяют оценить возможности согласования пара-



метров УЗП инструментом в различных диапазонах частот. Это позволяет проводить оперативную и периодическую диагностику УЗ сварочного оборудования в цеховых условиях, поскольку не требуется трудоёмкой разборки сварочной головки и использования стендового оборудования.

#### Список использованных источников

1. Harman G.G. Wire bonding in microelectronics. N.Y.: McGraw Hill, 2010.
2. Ланин, В.Л., Петухов И.Б. Методика расчёта параметров УЗ-преобразователей повышенной частоты // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2013. № 5.
3. Ланин, В.Л., Петухов И.Б. Получение соединений повышенной плотности термозвуковой микросваркой в 3D интегральных микросхемах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2014. № 2-3.
4. Goh K.S., Zhong Z.W. Development of capillaries for wire bonding of low-k ultra-fine-pitch devices // Microelectronic Engineering. 2006. Vol. 83. No. 10.
5. Wang Y., Tyre J., Zhihong P., Shiquan W. Measurement of focused ultrasonic fields using a scanning laser vibrometer // J. Acoustic Soc. Am. 2007. Vol. 121. No. 5.
6. Electrical matching of low power piezoelectric ultrasonic transducers for microelectronic bonding / H. Zhang [and ets] // Sensors and Actuators A. 2013. Vol. 199. No. 9.
7. Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые / А.П. Достанко [и др.]. Минск: Бестпринт, 2009.
8. Lawrence E. Advancements in laser Doppler vibrometry for ultrasonic applications. [www.ultrasonics.org/aws/UIA](http://www.ultrasonics.org/aws/UIA).
9. CLV-2534 Compact Laser Vibrometer: <http://www.polytec.com>
10. Feng W., Meng Q., Xie Y., Fan H. Wire bonding quality monitoring via refining process of electrical signal from ultrasonic generator // Mechanical Systems and Signal Processing. 2011. Vol. 25. No. 3.