

# Мониторинг процесса ультразвуковой микросварки

## методом частотно-временного анализа вибраций инструмента

**В статье рассмотрены процессы и устройства непрерывного частотно-временного анализа вибраций инструмента в процессе ультра- и термозвуковой микросварки. Мониторинг и частотно-временной анализ сигналов технологических датчиков необходим при наладке и исследовании технологических процессов микросварки с целью получения наиболее качественных соединений.**

**Владимир Ланин,**  
профессор

vlanin@bsuir.by

**Игорь Петухов**

petuchov@kbtm.by

### Стадии образования соединений ультразвуковой микросваркой

Ультразвуковая (УЗ) сварка — одна из наиболее важных производственных операций при сборке изделий микроэлектроники. Она широко используется для обеспечения электрических контактов от кристалла к корпусу или плате. Расширение применения других технологий присоединения, в частности flip-chip, в обозримом будущем не заменит проволочного микромонтажа, так как промышленная инфраструктура этой технологии очень обширна.

Процесс УЗ-сварки без нагрева в общем случае состоит из четырех стадий [1], приведенных на рис. 1. На первой стадии (предварительная деформация) проволока деформируется на 15–20% в вертикальном направлении под действием приложенной нагрузки к инструменту. Величина предварительной деформации играет определяющую роль в последующем процессе сварки. При слишком сильной деформации существенно изменяется кристаллическая структура металла поверхности касания и самой проволоки и, соответственно, ухудшается качество сварного соединения.

На второй стадии (очистка) под действием внешней нагрузки и УЗ-колебаний в проволоке возникают напряжения сдвига, приводящие к разрыву поверхностной оксидной пленки, а также колебательное перемещение проволоки относительно контактной площадки. Эти перемещения способствуют удалению оксидной пленки и других загрязнений с контактирующих поверхностей, на это расходуется большая часть энергии колебаний. Лишь малая доля энергии деформирует проволоку. Инструмент совершает колебания вместе с проволокой вдоль поверхности касания.

На третьей стадии (деформация) преобладает пластическая деформация проволоки вследствие разогрева проволоки энергией УЗ-колебаний, в результате чего образуются очаги схватывания и создаются условия для диффузии в объеме соединения. Во время этой фазы происходит рост температуры проволоки. Колебания выравнивают трущиеся поверхности, вызывая рост температуры в месте касания.

Металлы притираются друг к другу до тех пор, пока расстояние между кристаллическими решетками не составит межатомное. Высокая температура пятна касания стимулирует взаимную диффузию атомов в дислокации решеток, происходит термический отпуск металлов в зоне сварки. С этого момента инструмент колеблется отдельно от неподвижной проволоки, вызывая дальнейшее повышение температуры.

На последней стадии (диффузия) происходит окончательное образование микросварного соединения и возникновение интерметаллических фаз вследствие процесса диффузии. Существенного роста температуры или деформации не происходит. Теплота, выделяемая при трении капилляра о поверхность приваренной проволоки, расходуется на нагрев пятна сварки. Это вызывает дальнейший отпуск металла в месте сварки. Процесс отпуска стабилизирует зону сварки, поскольку из-за постепенного отверждения металлов в зоне диффузии соединение получается хрупким.

Величина механической энергии УЗ-колебаний, вводимой в зону формирования микросварного соединения, определяется в основном их амплитудой  $A$  и частотой  $\omega$ :

$$E = 1/2\rho V(A\omega)^2, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность материала;  $V$  — объем зоны соединения.



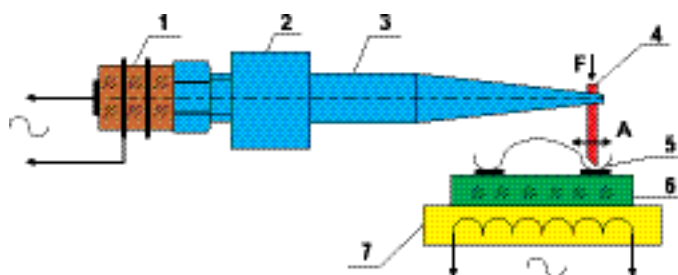


Рис. 2. Схема технологической системы микросварки: 1 — УЗ-преобразователь, 2 — стакан, 3 — волновод, 4 — инструмент, 5 — микропроводник, 6 — кристалл, 7 — столик

До начала 1990-х годов в установках УЗ-сварки использовались УЗ-системы на частоте 60 кГц. С освоением технологии smart-card, когда необходимо производить процесс присоединения золотой проволокой малых диаметров методом «шарик-клин» при пониженной температуре, ведущие производители сборочного оборудования начали активно использовать УЗ-системы повышенной частоты в диапазоне от 90 до 140 кГц. Повышение частоты УЗ-колебаний для сварки микропроводников следует рассматривать как возможность снизить величину амплитуды колебаний без изменения акустической мощности. Понижение амплитуды колебаний в свою очередь уменьшает знакопеременные напряжения в свариваемых материалах и опасность усталостного разрушения, вероятность которого особенно велика при сварке тонких проводников. Как правило, частота УЗ-колебаний стабилизируется в процессе микросварки с помощью системы фазовой автоподстройки частоты УЗ-генератора. Поэтому для обеспечения воспроизводимости качества получаемых микросварных соединений важен непрерывный контроль амплитуды колебаний.

**Системы автоматического контроля амплитуды колебаний**

Основной любой установки микросварки является УЗ-система, в которую входят ультразвуковой генератор (УЗГ) и ультразвуковой преобразователь (УЗП), преобразующий электрическую энергию в энергию механических колебаний. Конструкция УЗП состоит из таких частей, как [2] (рис. 2): пьезоэлектрический вибратор 1 из 4 или 6 пьезокерамических колец, стянутых между собой шпилькой с ме-

таллическими накладками; цилиндрический держатель (стакан) 2, закрепленный в узле волновода 3 и предназначенный для крепления УЗ-системы в сварочной головке установки. На конце волновода закреплен микроинструмент 4 с помощью клеммного или торцевого зажима. Сечение волновода обычно уменьшается к месту крепления микроинструмента, чем достигается необходимый коэффициент усиления механических колебаний.

В процессе УЗ-сварки граничные условия системы на кончике инструмента непрерывно меняются из-за изменения механических свойств материала на границе. Все это эффективно влияет на колебательное поведение волновода и капилляра. Анализ вибрационных сигналов может дать информацию о параметрах настройки сварки, а также о качестве формируемого соединения.

Система мониторинга состоит из пьезоэлектрического датчика, прикрепленного к поверхности волновода, электрометрического усилителя, высокочастотного фильтра, цифрового осциллографа и компьютера [3] (рис. 3). Для того чтобы избежать чрезмерной нагрузки на волновод, размеры пьезоэлектрического датчика должны быть достаточно малы. Кроме того, датчик должен быть сконструирован таким образом, чтобы частотная характеристика его была более равномерной в рабочем диапазоне частот (0–500 кГц). Обнаруженный пьезоэлектрическим датчиком сигнал усиливается электрометрическим усилителем, а затем проходит через фильтр высоких частот для удаления шума в низкочастотном диапазоне. Отфильтрованный сигнал, с преобладающей частотой 62,5 кГц, входит в осциллограф и затем записывается на компьютер. Сохраненные данные, проанализированные

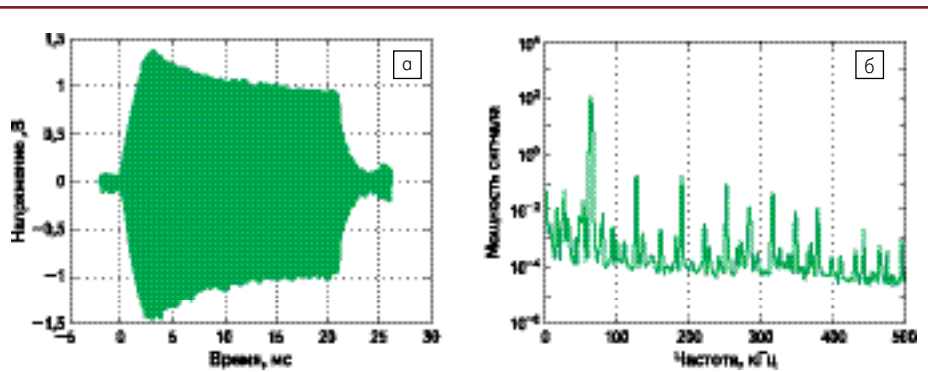


Рис. 4. Форма сигнала хорошей сварки (а) и частотный спектр мощности (б)



Рис. 3. Система мониторинга УЗ-сварки

с помощью частотно-временного анализа гармоник сигнала, импортируются в нейронную сетевую систему для распознавания настроек сварочной машины и прогнозирования качества сварки.

В процессе формирования микросварного соединения вибрационное поведение волновода постоянно меняется в соответствии с изменениями на межфазной границе в зоне сварки проволочного вывода. Поэтому рабочая частота вибрации волновода разная в процессе сварки. С другой стороны, УЗ-сигнал микросварки содержит несколько высших гармоник. Поэтому необходимо проанализировать вибрацию волновода как во временной, так и в частотной области.

Для частотно-временного анализа сигналов датчика можно использовать преобразования Фурье, расширения Гора, распределения Вигнера-Вилле и др. На рис. 4 показаны типовые колебания волновода во времени, а также соответствующий частотный спектр, полученный преобразованием Фурье. Из спектра можно выделить частотные компоненты и их относительную амплитуду. Три основные гармоники соответствуют частотам 62,5, 125 и 187,5 кГц, в то время как вторая и третья из них довольно малы по сравнению с первой, которая соответствует основной рабочей частоте. На рис. 5 эти изменения амплитуды проявляются очень четко, особенно для первой гармоники, что можно использовать для контроля процесса УЗ-микросварки.

Для мониторинга амплитуды колебаний в месте контакта и прогнозирования качества микросварного соединения применяются также микросенсоры в виде пьезоэлектрических датчиков, смонтированных в контактную площадку кристалла, которые позволяют измерять как нормальную, так и тангенциальную силу при УЗ-воздействии. В дополнение к пьезодатчику используют лазерный виброметр для измерения перемещения капилляра во время формирования соединения [4].

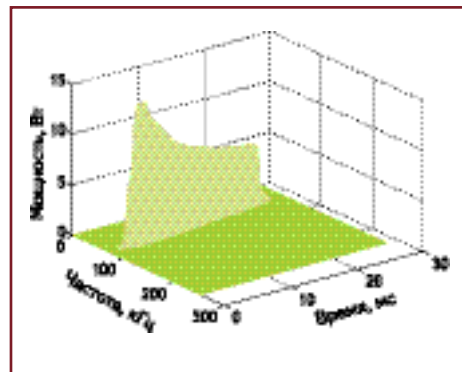


Рис. 5. Частотно-временное распределение хорошей сварки

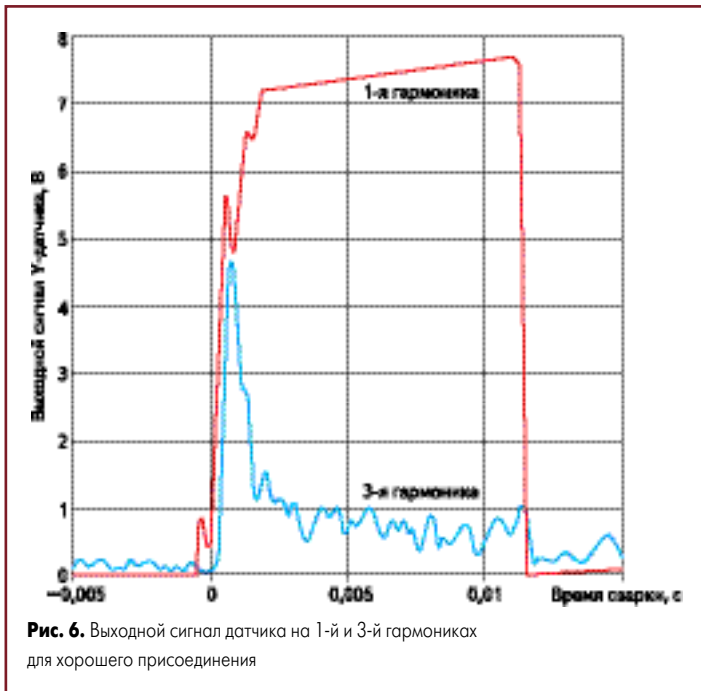


Рис. 6. Выходной сигнал датчика на 1-й и 3-й гармониках для хорошего присоединения

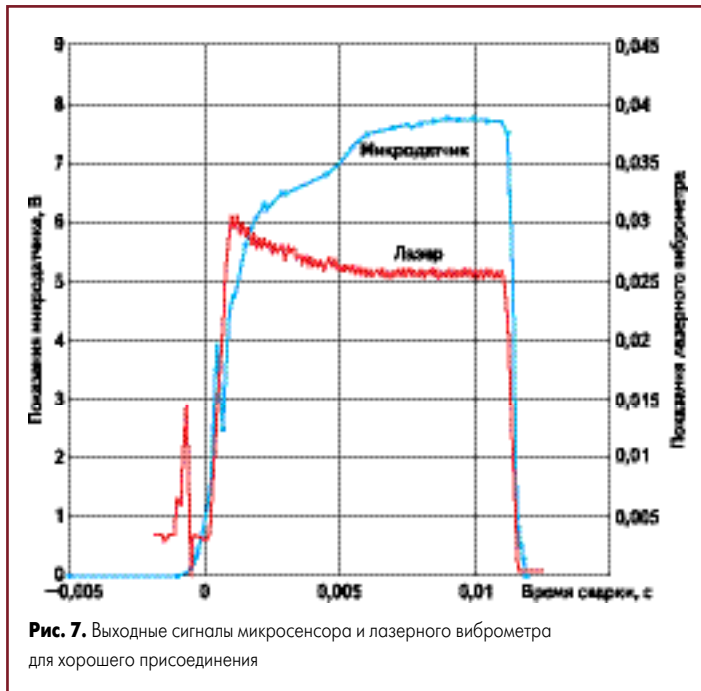


Рис. 7. Выходные сигналы микросенсора и лазерного виброметра для хорошего присоединения

Сигналы от микросенсора в направлении действия УЗ (У) измерялись в течение процесса присоединения. Первая и третья гармоники сигнала сравнивались при нормальном процессе присоединения и в случае не присоединения. Первый гармонический сигнал на частоте УЗ-преобразователя 122 кГц является непосредственной мерой уровня напряжений, создаваемых при УЗ-удалении оксида. Третий гармонический сигнал является мерой межфазного трения между Аu шариком и Аl площадкой и свидетельствует о силе трения (рис. 6).

Недостаток использования микросенсоров — применение специального кристалла. Установлено, что сигнал лазерного виброметра хорошо коррелирует с сигналом микросенсора. Подъем первой гармоники свидетельствует об образовании соединения на межфазной поверхности. Растущее соединение снижает относительное движение скольжения на соединяемой поверхности, что вызывает падение первой гармоники сигнала лазерного виброметра (рис. 7).

На установках УЗ-сварки без системы контроля процесса равная энергия прилагается на всех трех стадиях сварки, хотя в реально-

сти в каждой из этих стадий требуется разная энергия. Так, первая стадия очистки требует гораздо более высокой энергии, чем вторая фаза — перемешивания. Фаза диффузии требует небольшой мощности, которая расходуется на подогрев поверхностей в зоне сварки.

Сварка с постоянной мощностью и длительностью — типичный, но не лучший метод. Качество и прочность сварных соединений возросли бы существенно, если бы можно было отслеживать реальные значения деформации и регулировать мощность воздействия в процессе сварки. Такая система контроля процесса сварки разработана фирмой F&K Delvotec и названа Bond Process Control (BPC) [5]. Эта система работает на большинстве установок сварки алюминиевой проволокой, наряду с другими устройствами, призванными гарантировать безупречное качество и быстрдействие (система контроля по импедансу соединения, встроенный пулл-тестер и др.).

Принцип работы BPC поясняется ее схемой (рис. 8). Ключевой элемент схемы — прецизионный датчик движения, установленный на подшипнике преобразователя. Этот датчик отслеживает вертикальное перемещение инструмента после касания, с высокой точно-

стью измеряя деформацию проволоки. Сигнал от датчика поступает на АЦП, преобразуется в цифровую форму и обрабатывается контроллером, который регулирует мощность УЗ-генератора в зависимости от заданных эталонных параметров. Измеренные параметры сварки отображаются на мониторе компьютера, и их можно задокументировать. Для каждой сварной точки система BPC хранит параметры минимальной и максимальной мощности, времени сварки, предварительной деформации, график деформации и мощности при сварке (таблица).

**Исследования распределения амплитуд и частот колебаний**

Для исследования распределения амплитуды и частот колебаний вдоль УЗ технологической системы микросварки применена сканирующая лазерная система PSV-400, которая является наиболее передовым средством для бесконтактных измерений, визуализации и анализа колебаний различных конструкций. Система PSV-400 представляет собой четвертое поколение систем сканирующей виброметрии компании Polytec (Германия). «Сердцем» PSV-400

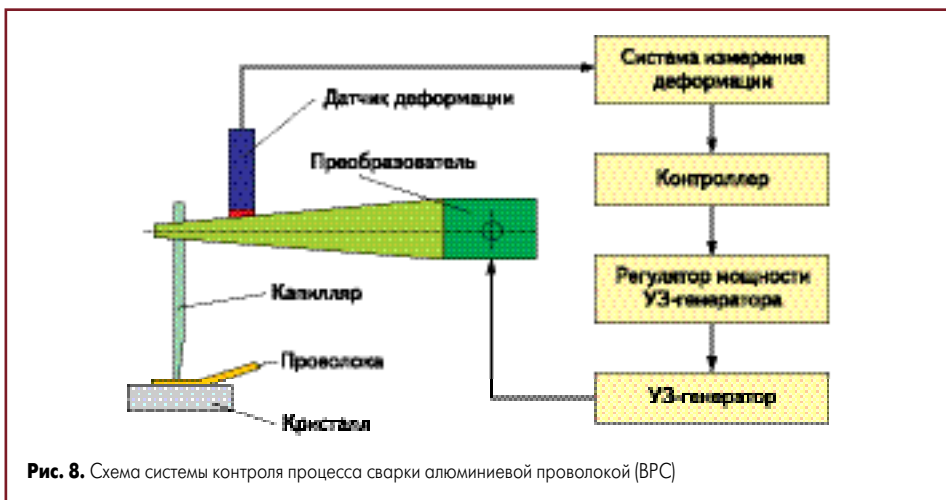


Рис. 8. Схема системы контроля процесса сварки алюминиевой проволокой (BPC)

Таблица. Параметры сварки на экране

Параметры сварки	Численное значение
Начальная мощность УЗ	85% от max
Эталонный угол наклона	65°
Шаги после касания	8
Нагрузка	20 сН
Угол сварки	0°
Реальная деформация	103%
Минимальная деформация	35%
Максимальная деформация	250%
Программируемая деформация	95%
Энергия УЗ, Вт	10% от max
Номер петли	12
Время сварки	26 мс
Задержка	0 мс
Предельное время сварки	45 мс



Рис. 9. Лазерный бесконтактный виброметр OFV-2500



Рис. 10. Распределение амплитуды колебаний вдоль технологической системы

является лазерный доплеровский виброметр — высокоточный оптический датчик для определения виброскорости и виброперемещения в заданной точке, принцип работы которого основан на эффекте Доплера и заключается в обнаружении смещения частоты света, отраженного от движущейся поверхности. Это позволяет измерять частоты от 0 Гц до 24 МГц и виброскорость от 0,02 мкм/с до 20 м/с.

В состав системы входят: контроллер OFV-2500, оснащенный аналоговым и цифровым декодером скорости; измерительная головка, состоящая из сенсора виброметра OFV-505, высокоточного сканера и цветной видеокамеры с возможностью автофокусировки и 72-кратным увеличением; блок коммутации с кабелем длиной 10 м; промышленный персональный компьютер с операционной системой Windows XP или Vista 64, Gigabit Ethernet, монитор 24" и штатив с поворотной-наклонной переходником (рис. 9). При скорости сканирования до 30 точек/с диапазон сканирования составляет  $\pm 20^\circ$  по осям X, Y; угловое разрешение  $< 0,002^\circ$ , угловая стабильность  $< 0,01^\circ/\text{ч}$ .

Динамические характеристики УЗП проверялись на сканирующей лазерной системе PSV-400 Polytec, предоставленной для теста компанией «НОВАТЕСТ» (Москва). Распределение амплитуды колебания вдоль сварочного инструмента, приведенное на рис. 10, показывает, что резонансная частота системы находится на уровне 66,2 кГц, а амплитуда колебаний инструмента составляет 1–1,5 мкм.

Термозвуковая сварка (ТЗС) в связи с воздействием УЗ-колебаний характеризуется слож-

ной схемой напряженно-деформированного состояния свариваемых материалов с одновременным протеканием в зоне сварки таких процессов, как трение, пластическая деформация, отдых, возврат, рекристаллизация и др. Все эти процессы взаимосвязаны между собой и определяют окончательные свойства сварных соединений. Большинство исследователей считает, что трение в контакте при УЗ-сварке дает основной вклад в формирование соединений.

При ТЗС Au проводников, оплавленных в шарик, к кристаллам в реальном масштабе времени кинетика процессов трения в зоне сварки не исследовалась, тем более что инструменты типа капилляр обеспечивают надежный захват шарика конической зоной, выполненной как фаска на выходе капиллярного отверстия.

Исследования производили на установках с УЗ-частотами 60 и 120 кГц в режиме автоподстройки частоты на резонансную частоту преобразователя и с подогревом подложки до 240 °С. Золотые проводники, оплавленные в шарик, приваривали к пленкам из Al толщиной 0,9–1,2 мкм, нанесенным термическим испарением в вакууме  $10^{-5}$  торр. Подложка располагалась на пьезодатчике (рис. 11), сигнал с которого передавался на осциллограф.

Для исследования кинетики взаимного перемещения проволоки и подложки использовали методику регистрации осциллограмм изменения напряжения на контактных поверхностях «проволока — подложка». Известно, что процессы трения вызывают электрический

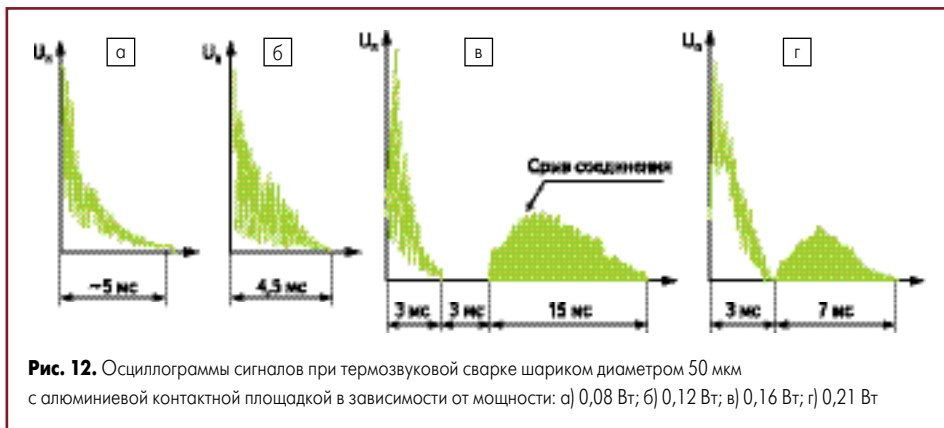


Рис. 11. Расположение пьезодатчика на УЗ-инструменте

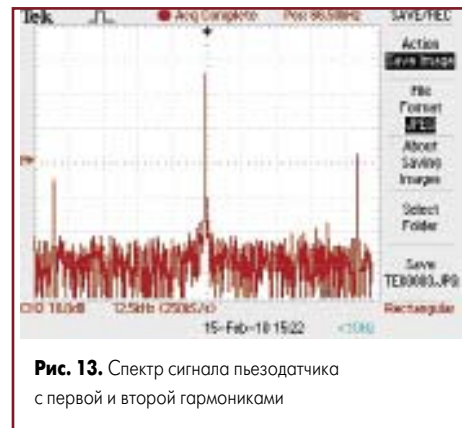
сигнал, изменяющийся с непостоянной частотой до тех пор, пока существует скользящий контакт между двумя материалами. Этот сигнал усиливался на широкополосном усилителе с полосой пропускания до 1 МГц, а затем фиксировался на экране запоминающего осциллографа и фотографировался (рис. 12).

При оптимальном усилии нагружения инструмента ( $F = 0,4 \text{ Н}$ ) и времени УЗ 20 мс увеличение мощности влияет на характер изменения напряжения в контакте «Au шарик — пленка Al». Из анализа осциллограмм следует, что до момента включения УЗК первоначальный уровень сигнала датчика  $U_n$  определяется площадью контакта между соединяемыми материалами, зависящей от величины усилия  $F$ . После включения УЗК величина  $U_n$  резко возрастает, что связано с процессами перемещения проволоки относительно подложки, то есть с наличием скользящего контакта. Затем наблюдается уменьшение  $U_n$  до определенного уровня, который ниже первоначального и зависит от мощности УЗГ. Величина перепада этих уровней характеризует установившуюся площадь контакта «проволока — пленка» после прекращения процессов трения в нем.

Увеличение мощности УЗ от 0,08 до 0,12 Вт приводит к уменьшению времени существования скользящего контакта с 5 до 4 мс. При этом разница между начальным и конечным уровнем сигнала пьезодатчика  $U_n$  во втором случае больше, так как увеличивается амплитуда колебаний капилляра, а следовательно, и амплитуда перемещения проволоки относительно подложки, приводящая к более интенсивному тепловыделению в контакте и большей степени осадки проводника. Интересно, что при увеличении мощности УЗГ (рис. 12в) скользящий контакт регистрируется повторно после паузы  $\approx 3 \text{ мс}$  в первом случае или сразу же после затухания процессов трения (рис. 12г). Металлографические исследования показали, что очаги взаимодействия в зоне сварки образуются почти с самого начала включения колебаний. Дело в том, что по мере протекания процессов трения увеличивается как площадь контактирования, так и количество очагов взаимодействия, что



**Рис. 12.** Осциллограммы сигналов при термозвуковой сварке шариком диаметром 50 мкм с алюминиевой контактной площадкой в зависимости от мощности: а) 0,08 Вт; б) 0,12 Вт; в) 0,16 Вт; г) 0,21 Вт



**Рис. 13.** Спектр сигнала пьезодатчика с первой и второй гармониками

обуславливает увеличение сопротивления перемещению проволоки относительно подложки, которое должно превышать сопротивление перемещению «инструмент — проволока».

Гармонический сигнал пьезодатчика содержит первую гармонику на частоте 66,5 кГц и вторую гармонику с частотой 121 кГц и амплитудой приблизительно в 2 раза меньшей первой (рис. 13). Амплитуда второй гармоники зависит от установленных режимов сварки и очевидно — от качества процесса. Выявление этой зависимости требует дополнительных исследований при различных режимах сварки и последующих тестов на прочность присоединения.

### Заключение

Исследования показали, что в спектре сигнала УЗ-колебаний наряду с первой гармоникой присутствуют 2-я и 3-я гармоники, амплитуда которых зависит от характера протекания процесса термозвуковой микросварки. Мониторинг и частотно-временной анализ сигналов технологических датчиков могут быть использованы при отладке и ис-

следованиях технологических процессов УЗ и термозвуковой микросварки для получения наиболее качественных соединений.

### Литература

1. Harman G. G. Wire Bonding in Microelectronics. 3 Edition. N. Y.: McGraw Hill, 2010.
2. Ланин В., Петухов И., Шевцов В. Ультразвуковое оборудование для сварки микропроводников // Компоненты и технологии. 2009. № 8.
3. Zhang D., Ling S.-F. Monitoring Wire Bonding via Time-Frequency Analysis of Horn Vibration // IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing. 2003. № 3.
4. Qin I., Shan A., Huynh C. and ets. Thermosonic Au ball Process Investigated using Microsensor and Laser Vibrometer // Proceeding 60<sup>th</sup> Electronics Components and Technology Conf. 1–4 June. Singapore, 2010.
5. Фарассат Ф., Валева С. Контроль процесса ультразвуковой сварки: решение проблем мгновенной оценки качества, документирования и статистического анализа // Электронные компоненты. 2004. № 11.