

Повышение качества микросварных соединений в интегральных схемах с использованием ультразвуковых систем повышенной частоты

Разработаны ультразвуковые системы повышенной частоты для микросварки с высоким качеством золотых и алюминиевых проводников диаметром от 20 до 200 мкм. Повышение частоты колебаний до 94 кГц позволяет увеличить скорость нагрева в зоне сварки, снизить знакопеременные напряжения в свариваемых материалах и обеспечить процесс формирования соединений за более короткое время.

Владимир Ланин,
профессор

vlanin@bsuir.by

Игорь Петухов

petuchov@kbtcm.by

Дмитрий Мордвинцев

Типы микросварных соединений в интегральных схемах

Прогресс в развитии методов формирования межсоединений позволил существенно снизить трудоемкость этих операций и добиться заметных успехов на пути к их полной автоматизации. Однако трудоемкость операций формирования межсоединений остается определяющей в процессе производства изделий микроэлектроники и для разных типов приборов составляет от 30 до 60% всей трудоемкости сборки. При этом на долю разрушения межсоединений приходится и значительный процент отказов изделий при эксплуатации. Поэтому выбору метода присоединения выводов в изделии уделяется особое внимание.

При монтаже изделий электронной техники одним из наиболее распространенных способов электрического соединения между контактными площадками кристалла и выводами корпуса является соединение с помощью проволочных и ленточных выводов, что объясняется высокой автоматизацией процесса, универсальностью по отношению к различным технологическим вариантам производства и геометрическим размерам изделий [1].

Среди основных методов подсоединения микропроводников, таких как термокомпрессионная сварка (ТКС), ультразвуковая сварка (УЗС), термозвуковая сварка (ТЗС), сварка расщепленным электродом, сварка косвенным импульсным нагревом, наиболее широкое распространение получили методы ТЗС «шарик-клин» с использованием золотой (медной)

проволоки диаметром 17,5–50 мкм и УЗС «клин-клин» для алюминиевой проволоки диаметром 20–500 мкм [2]. Золотую проволоку также присоединяют методом «клин-клин», используя при этом подогрев изделия (иногда и микроинструмента).

Внешний вид первой и второй сварки соединения золотой проволоки методом «шарик-клин» показан на рис. 1, а соединения алюминиевой проволоки методом «клин-клин» — на рис. 2.

До начала 1990-х годов в установках ТЗС и УЗС использовались ультразвуковые системы на частоте порядка 60 кГц. После выхода публикации [3] в 1997 году ведущие производители сборочного оборудования начали активно использовать ультразвуковые системы повышенной частоты в диапазоне от 90 до 140 кГц. Начиная с этого периода и до настоящего времени появилось большое число работ по результатам использования подобных ультразвуковых систем.

В отечественном производстве использование УЗ систем повышенной частоты берет начало с середины 1990-х годов с освоением технологии smart-card, когда необходимо было проводить процесс присоединения золотой проволокой методом «шарик-клин» контактных площадок кристаллов с площадками на ленте Heraeus (Германия) при температуре не более 140 °С.

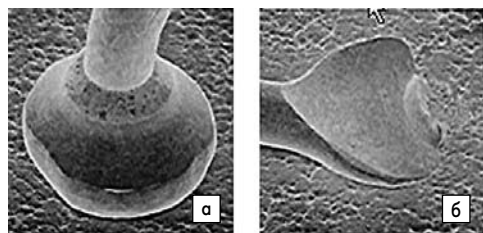


Рис. 1. Внешний вид соединения, полученных методом «шарик-клин»: а) первой сварки; б) второй сварки

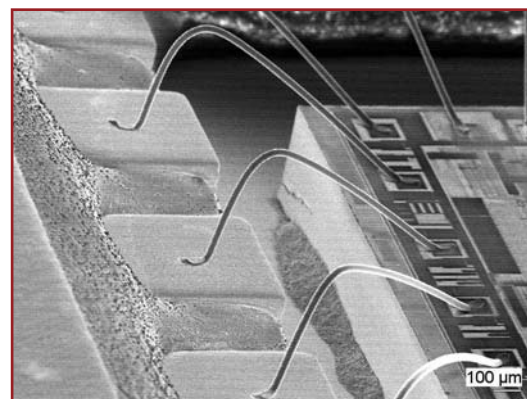


Рис. 2. Внешний вид соединений, полученных методом «клин-клин»

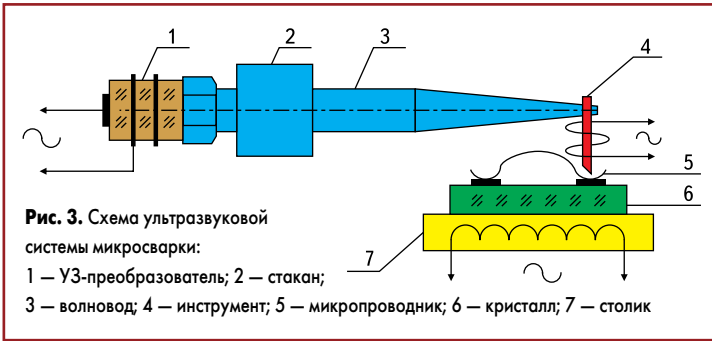


Рис. 3. Схема ультразвуковой системы микросварки:

1 — УЗ-преобразователь; 2 — стакан; 3 — волновод; 4 — инструмент; 5 — микропроводник; 6 — кристалл; 7 — столик

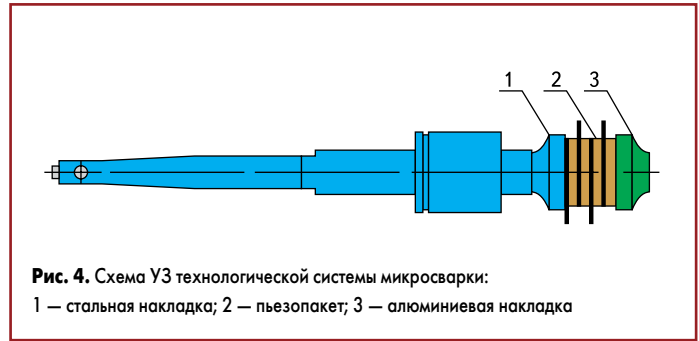


Рис. 4. Схема УЗ технологической системы микросварки:

1 — стальная накладка; 2 — пьезопакет; 3 — алюминиевая накладка

Ультразвуковые системы для микросварки

Основой любой установки микросварки является ультразвуковая система, включающая ультразвуковой генератор (УЗГ) и ультразвуковой преобразователь (УЗП), преобразующий электрическую энергию в энергию механических колебаний. Конструкция УЗП состоит из следующих составных частей (рис. 3): пьезоэлектрического вибратора 1, состоящего из 4 или 6 пьезоэлектрических 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 микроинструмент 4 с помощью клеммного или торцевого зажима. Сечение волновода обычно уменьшается к месту крепления микроинструмента, чем достигается необходимый коэффициент усиления механических колебаний.

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.

Следует предположить, что увеличение частоты колебаний позволит увеличить темпа роста и значение температуры в зоне сварки и обеспечить процесс формирования соединений за меньшее время и при меньшей температуре нагрева изделия. Выбор частоты резонанса зависит от конструктивных размеров сварочных головок оборудования для возможности его модернизации. Использование повышенной ультразвуковой частоты (94 кГц) по сравнению со стандартной частотой (66 кГц) позволяет вести присоединение проводников при температуре нагрева изделия 100...180 °С [4]. При необходимости можно использовать дополнительный нагрев микроинструмента, если не допускается нагрев изделия ниже 100 °С.

Схема УЗ технологической системы микросварки повышенной частоты представлена на рис. 4, исходные данные к расчету представлены в таблице. В состав УЗ технологической системы микросварки входит пакетный пьезоэлектрический преобразователь, состоящий из 4 колец пьезоэлектрики PIC-181 фирмы PI (Германия), волновод-концентратор из стали ШХ15, стальная и алюминиевая накладки.

Зависимость резонансной частоты от размеров и свойств материала в УЗ пакетном преобразователе выражается следующей формулой:

$$\frac{\omega l_c}{c_c} + \arctg\left(\frac{S_1 \rho_1 c_1}{S_c \rho_c c_c} \operatorname{tg} \frac{\omega l_1}{c_1}\right) + \arctg\left(\frac{S_2 \rho_2 c_2}{S_c \rho_c c_c} \operatorname{tg} \frac{\omega l_2}{c_2}\right) = \pi, \quad (1)$$

где S_c, S_1, S_2 — площади поперечного сечения пьезопакета, стальной и алюминиевой накладки соответственно; ω — угловая частота.

После подстановки в (1) известных величин и решения уравнения относительно ω получаем значение частоты, равное 94 372 Гц.

Для сохранения спектра собственных частот и вида колебаний (в частности, изгибных) необходимо соблюдать условие:

$$\lambda/d > (8-10), \quad (2)$$

где λ — длина волны изгибных колебаний; d — максимальный диаметр сечения инструмента.

При работе УЗ технологической системы микросварки имеет место появление боковых частот, гармоник и субгармоник резонансной частоты [5].

Периодический сигнал $U(t)$ с периодом $T = 1/f$ можно представить рядом Фурье:

$$U(t) = \frac{U_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\omega_1 t - \varphi_n), \quad (3)$$

где U_0 — постоянная составляющая, которая представляет собой среднее значение сигнала:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U(t) dt; \quad (4)$$

U_n — модуль амплитуды каждой гармоники:

$$U_n = (a_n^2 + b_n^2)^{1/2}, \quad (5)$$

где $a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U(t) \cos(n\omega_1 t) dt;$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U(t) \sin(n\omega_1 t) dt; \quad (6)$$

φ_n — фаза каждой гармоники:

$$\varphi_n = \arctan(b_n/a_n). \quad (7)$$

Выражение (3) показывает, что периодическая функция $U(t)$ может быть представлена суммой синусоидальных колебаний с частотами, кратными основной частоте ω_1 , и с надлежащим образом подобранными амплитудами и начальными фазами. Анализ спектра

Таблица. Исходные данные для расчета

Параметр	Обозначение	Значение
Длина пьезопакета, мм	l_c	8
Длина стальной накладки, мм	l_1	5
Длина алюминиевой накладки, мм	l_2	6
Внешний/внутренний диаметры пьезоэлектрических шайб, мм	D_c/d_c	12,7/5,2
Диаметр стальной накладки, мм	D_1	12,7
Диаметр алюминиевой накладки, мм	D_2	12,7
Удельная плотность пьезоэлектрики, кг/м ³	ρ_c	7800
Удельная плотность стали (марка ШХ15), кг/м ³	ρ_1	7800
Удельная плотность алюминия, кг/м ³	ρ_2	2800
Скорость распространения УЗ в пьезоэлектрике, м/с	c_c	3400
Скорость распространения УЗ в стали, м/с	c_1	5050
Скорость распространения УЗ в алюминии, м/с	c_2	5100

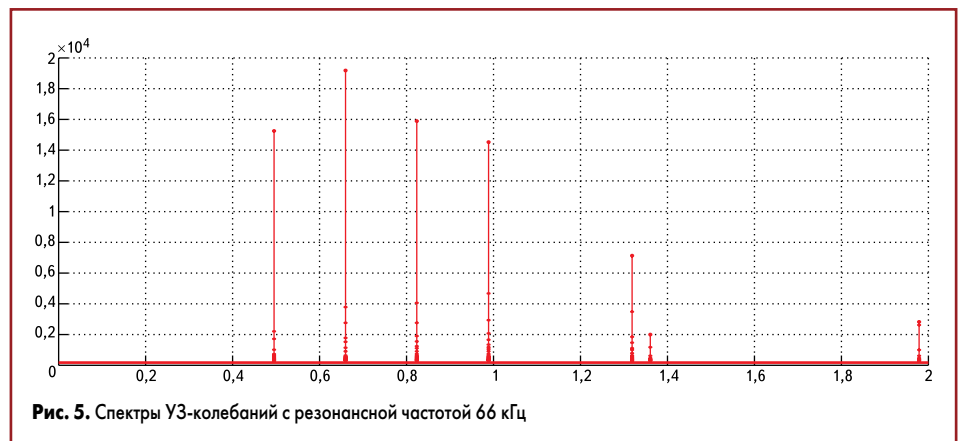


Рис. 5. Спектры УЗ-колебаний с резонансной частотой 66 кГц



Рис. 6. УЗ-преобразователь с частотой резонанса 94 кГц

УЗ-системы с резонансной частотой 66 кГц показал, что, помимо резонансной частоты, в нем содержатся следующие гармоники: 49,5 кГц (3/4), 82,5 кГц (5/4), 99,2 кГц (6/4), 132 кГц (2-я), 198 кГц (3-я), 264 кГц (4-я) (рис. 5).

Разработанная конструкция УЗП выполнена в классическом варианте с коэффициентом трансформации 2 и с частотой резонанса 94 кГц (рис. 6).

Исследования распределения амплитуды и частот колебаний

Для исследования распределения амплитуды и частот колебаний вдоль УЗ технологической системы микросварки применен бесконтактный виброметр PSV-400, который является наиболее передовым средством для бесконтактных измерений, визуализации и анализа колебаний различных конструкций. Виброметр PSV-400 представляет четвертое поколение систем сканирующей виброметрии компании Polytec (Германия). «Сердцем» 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 дает возможность измерения частот от 0 Гц до 24 МГц и виброскорости от 0,02 мкм/с до 20 м/с.

В состав виброметра входят: контроллер OFV-5000, 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 и блока коммутации с кабелем длиной 10 м; промышленный персональный компьютер с операционной системой Windows XP или Vista 64, Gigabit Ethernet, монитор 24" и штатив с поворотным наклонным переходником (рис. 7).



Рис. 7. Лазерный бесконтактный виброметр

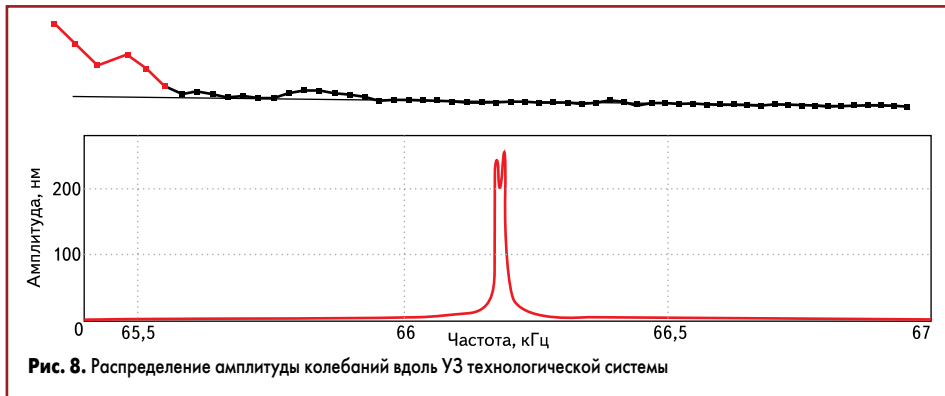


Рис. 8. Распределение амплитуды колебаний вдоль УЗ технологической системы

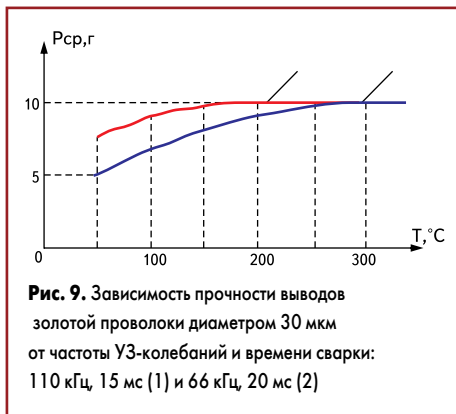


Рис. 9. Зависимость прочности выводов золотой проволоки диаметром 30 мкм от частоты УЗ-колебаний и времени сварки: 110 кГц, 15 мс (1) и 66 кГц, 20 мс (2)

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. 8, показывает, что резонансная частота системы находится на уровне 66,2 кГц, а амплитуда колебаний инструмента составляет 1,0–1,5 мкм.

Первый положительный опыт был получен на автоматических установках типа ЭМ-4260 (частота УЗ-системы — 138 кГц), модернизированной установке ЭМ-4060П (частота УЗ-системы — 110 кГц) и ЭМ-4360 (110 кГц). Результаты проведенных тестов зависимости прочности выводов от частоты УЗ-системы и времени сварки приведены на рис. 9.

На рис. 9 видно, что максимальная прочность при стандартной частоте колебаний 66 кГц достигалась за 20 мс и температуре нагрева стола 220...240 °С. Повышение частоты колебаний до 110–120 кГц обеспечило высокое качество и надежность соединений при температуре 120 °С и за меньшее время сварки.

Особый интерес представляет сварка алюминиевых проводников при повышенной частоте УЗ-колебаний. Внешний вид соединения алюминиевой проволоки диаметром 30 мкм с золоченой подложкой показан на рис. 10.

При разварке использовался микроинструмент фирмы K&S типа 4WA. Дополнительные тесты на разрывное усилие показали высокую прочность сварных соединений 11–14 г для проволоки диаметром 30 мкм с исходным разрывным усилием 20–21 г и относительным удлинением примерно 1%.



Рис. 10. Внешний вид сварного соединения алюминиевой проволоки диаметром 30 мкм на частоте 120 кГц

Заключение

Полученные результаты позволяют значительно улучшить технологию микросварки изделий электронной техники и модернизировать полуавтоматические установки ультразвуковой и термозвуковой микросварки, придав им новые технологические свойства и возможности, что позволит производить качественные присоединения микропроводников золотой и алюминиевой проволоки диаметром микропроводников (20–75 мкм) в широком диапазоне температур нагрева изделий (100...250 °С) и ленточных переключателей с размерами до 200 мкм.

Литература

1. Онегин Е. Е., Зенькович В. А., Битно Л. Г. Автоматическая сборка ИС. Минск: Выш. школа, 1990.
2. Шмаков М. Микросварка при производстве микросборок и гибридных интегральных микросхем // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 5.
3. Ramsey T., Alfaro C. High-Frequency Enhancement for Ambient Temperature Ball Bonding // Semiconductor International. 1997. № 8.
4. Ланин В., Петухов И., Шевцов В. Ультразвуковое оборудование для сварки микропроводников // Компоненты и технологии. 2009. № 8.
5. Or S. W., Chan H. L. W., Lo V. C., Yuen C. W. Dynamics of an Ultrasonic Transducer Used for Wire Bonding // IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control. 1998. V. 45. № 6.
6. Ланин В., Волкенштейн С., Петухов И., Хмыль А. Монтаж ленточными переключателями мощных полупроводниковых приборов // Компоненты и технологии. 2008. № 12.