

ТЕРМОЗВУКОВОЕ ПРИСОЕДИНЕНИЕ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ К КОНТАКТНЫМ ПЛОЩАДКАМ

В.Ланин vlanin@bsuir.by
И.Петухов petuchov@kbtcm.by

Приварка проволочных и ленточных выводов остается одним из наиболее распространенных способов электрического соединения между контактными площадками кристалла и выводами корпуса при монтаже изделий электронной техники [1]. Это объясняется его высокой автоматизацией и универсальностью применения независимо от вида технологического процесса и геометрических размеров изделий.

Среди основных методов присоединения микропроводников сваркой, таких как термокомпрессионная (ТКС), ультразвуковая (УЗС), термозвуковая (ТЗС), расщепленным электродом, косвенным импульсным нагревом наиболее широкое распространение получили ТЗС с использованием золотой проволоки и УЗС алюминиевой проволокой диаметром 20–75 мкм [2]. Все большую популярность получает именно ТЗС, при которой соединение формируется в результате совместного действия температуры, ультразвуковых (УЗ) колебаний и давления. К достоинствам ТЗС для соединений типа "шарик-клин" и "клин-клин" следует отнести возможность получения соединения разнородных материалов. Особенно эффективно применение этого способа для приварки золотой проволоки к алюминиевым, золотым и серебряным покрытиям контактных

площадок кристаллов и корпусов изделий электронной техники.

Термозвуковая сварка характеризуется сложной схемой напряженно-деформированного состояния свариваемых материалов с одновременным протеканием в зоне сварки таких процессов, как трение, пластическая деформация, отдых, возврат, рекристаллизация и других, под воздействием УЗ-колебаний и нагрева. Все эти процессы взаимосвязаны между собой и определяют окончательные свойства сварных соединений. Процесс ТЗС способом "шарик-клин" включает следующие этапы: формирование шарика, контактирование и предварительную деформацию, УЗ- и термическое воздействие. Процесс начинается с формирования шарика, который образуется в результате расплавления проволоки искровым разрядом между электродом разрядника и концом проволоки.

Материалом для выводов обычно служит золотая проволока Зл ПД 2,5 ТУ 48-1-415-77, Зл 999,9 ТУ 48-1-353-82 или алюминиевая — А 999 К 0,9 ЯеО.021.054 ТУ, АК 0,9 ПМ и АК 0,9 ПМ (ПТ) ЯеО.021.139 ТУ. Такие выводы пластичны, хорошо проводят теплоту и электрический ток, а также имеют низкое омическое сопротивление при контакте с металлическими пленками. Недостатки сварного соединения золотой проволоки — высокая стоимость, большой удельный вес, снижающаяся стойкость к вибрациям и ударным нагрузкам, невысокое сопротивление разрыву (для отожженной проволоки около 120 Н/мм²) и возможность образования при неблагоприятных условиях с алюминием хрупких и пористых соединений типа Al_nAu_m [3].

Использование выводов из чистого алюминия ограничено из-за невысокой прочности (для мягкой проволоки около ~75 Н/мм²), что вынуждает увеличивать диаметр проволоки до 100 мкм и приводит к увеличению площади проектируемых контактов. Лучшие характеристики имеет проволока из алюминий-кремниевых и алюминий-магниевого сплавов, прочность которых в отожженном состоянии достигает 450 Н/мм² при относительном удлинении до 4%.

Первые исследования возможности присоединения медной проволоки к контактным площадкам кристаллов интегральных схем и выводным рамкам начались более 25 лет назад, но только в настоящее время началось промышленное внедрение технологии присоединения медной проволоки [4]. Однако промышленное использование медной проволоки в сборке приборов электронной техники пока не превышает 5–10%. Растущий интерес к использованию медной проволоки как альтернативы золотой объясняется прежде всего меньшей стоимостью, которая приближается к стоимости алюминиевой проволоки. Это позволяет снизить стоимость приборов и повысить их конкурентоспособность.

Теплопроводность у меди в 1,6 раз выше, чем у алюминия, и в 1,3 раза выше, чем у золота [5]. Лучшая теплопроводность медной проволоки может обеспечить дополнительный теплоотвод от

кристалла прибора при большом числе выводов (табл.1). Меньшее электрическое сопротивление позволяет использовать медную проволоку диаметром в 1,25 раза меньшим по отношению к диаметру золотой проволоки при одной и той же плотности тока. Это преимущество актуально для транзисторов средней мощности в малогабаритных корпусах для поверхностного монтажа.

Диаметр провода D выбирается, исходя из величины тока I, длины соединения L и допустимого превышения температуры ΔT [6]:

$$I = \sqrt{\frac{K}{2\rho}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{L} \cdot \sqrt{\Delta T},$$

где K — коэффициент теплопроводности, ρ — электрическое сопротивление.

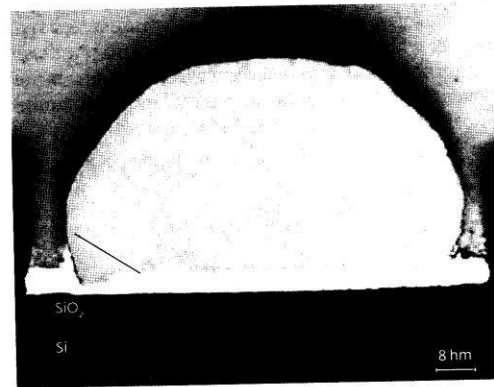


Рис.1. Поперечное сечение медного шарика, присоединенного к Al металлизации

Таким образом, медная проволока диаметром 20 мкм эквивалентна по электрическим параметрам алюминиевой проволоке диаметром 25 мкм.

Проведенные исследования [7–9] показали медленный рост интерметаллидов в зоне контакта медного шарика с Al металлизацией контактной площадки кристалла (рис.1). На рис.2а, б показан

Таблица 1. Свойства проволочных выводов при температуре 20°C

Тип проволоки	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Электрическое сопротивление, Ом·10 ⁻⁸	Температурный коэффициент, (1/К)10 ⁻⁶	Плотность, кг/м ³ ·10 ³
Cu	398	1,7	16,5	8,9
Al	243	2,7	25	2,71
Au	308	2,35	14,2	19,3

Таблица 2. Характеристика интерметаллидов Cu_n-Al_m

Фаза	Концентрация, ат.% Cu	Кристаллическая структура	Цвет	Твердость HV5	Сопротивление, ρ , мкОм/см	ТКЛР, ppm/ $^{\circ}C$	Плотность, г/см ²
Al	0,0–2,84	Кубическая	Серебряный	20–50	2,4	2,35	2,70
$CuAl_2$	31,9–33,0	Тетрагональная	Бело-желтый	324	7,0–8,0	1,61	4,36
$CuAl$	49,8–52,3	Моноклинная	Серый	628	11,4	1,19	2,7
Cu_4Al_3	55,2–56,3	Моноклинная	Бело-желтый	616	12,2	1,61	Нет данных
Cu_3Al_2	59,3–61,9	Тригональная	Бело-серый	558	13,4	1,51	Нет данных
Cu_9Al_4	62,5–69	Кубическая	Бело-светло желтый	549	14,2–17,3	1,76	6,85
93	80,3–100	Кубическая	Красный	60–100	2,0	1,73	8

процесс образования интерметаллидов в результате термического старения образцов сварки шариком золотой и медной проволоки при температуре 175 $^{\circ}C$. Результаты анализа показали, что рост слоя интерметаллидного слоя в соединении медной проволоки с алюминием контактной площадки кристалла происходит очень медленно.

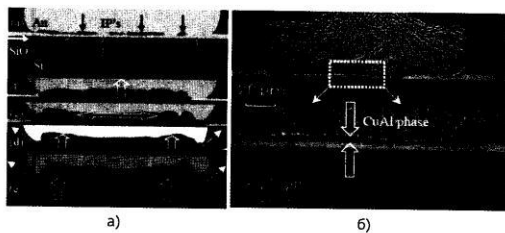


Рис.2. Образование интерметаллидов в результате термического старения образцов: а – соединение Au–Al после сварки (а); после выдержки в течение 12 ч (б); 100 ч (с); 200 ч (д) и 1000 ч (е); б – соединение Cu–Al после выдержки в течение 800 ч

Например, слой интерметаллида, обнаруженный после 800 ч выдержки при температуре 175 $^{\circ}C$, имел толщину 1 мкм. В соединении золота с алюминиевой площадкой слой интерметаллидов такой толщины был обнаружен через час. Другими словами, для создания надежного соединения необходимо введение большей энергии в зону сварки. С другой стороны, медленный рост интерметаллидного слоя повышает долговременную надежность образованного соединения при повышенных температурах. Отмечено также различие в строении кристаллических решеток золотой и медной проволоки и то, что золото намного активнее взаимодействует с алюминием, чем медь.

Несмотря на очевидные преимущества медной проволоки (табл.2), известны два основных недостатка, сдерживающих широкое ее применение. К первому недостатку относится быстрая окисляемость проволоки, особенно при повышенных температурах. Для предотвращения окисления при сборке методом "шарик-клин" используется инертный газ для получения шариков сферической формы на конце проволоки. Для подвода формирующего газа применяют разрядники особой конструкции и устройства формирования шарика повышенной мощности. Второй недостаток – это повышенная твердость медной проволоки, что требует тщательного подбора режимов сварки, исключающих кратерообразование на контактных площадках.

Для достижения качественной сварки медной проволокой обычно повышают нагрузку на сварочный инструмент и величину УЗ-энергии [10–12]. Но это приводит, во-первых, к повышенному механическому воздействию на контактную площадку кристалла и, во-вторых, к сокращению срока службы инструмента в результате интенсивного износа. Ведущие производители инструментов, такие как GAISER TOOL [12] и SPT [13], предлагают специально разработанные капилляры для медной проволоки, которые изготовлены из износостойкой керамики по новой технологии. Эти капилляры обеспечивают идеальное согласование с УЗ-системами повышенной частоты.

Надо отметить, что внедрению технологии термозвукового присоединения медной проволоки в промышленных условиях способствовали новые разработки УЗ-систем на повышенных ультразвуковых частотах. До настоящего времени производители изделий электронной техники используют медную проволоку диаметром 40–50 мкм в

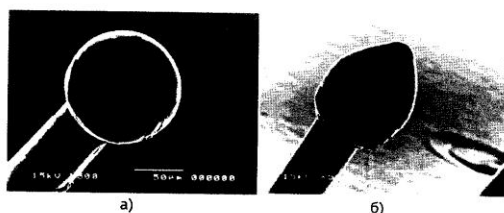


Рис.3. Форма медных шариков в инертной (а) и обычной (б) атмосфере

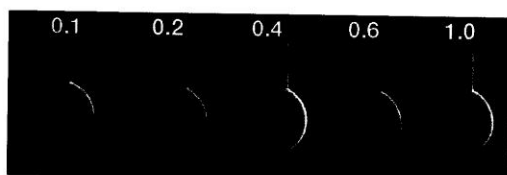


Рис.4. Форма медных шариков в зависимости от скорости подачи формирующего газа, л/мин

приборах средней мощности, а освоение технологии присоединения медной проволоки диаметром 25 мкм и менее в смарт-картах имеет много проблем. Несмотря на приведенные недостатки производители медной проволоки (Kulicke&Soffa, Hegaeus), сварочных инструментов (капилляров) и установок микросварки объединили свои усилия в решении проблем внедрения медной проволоки в технологии сварки. Мировой лидер в выпуске сборочного оборудования Kulicke & Soffa недавно анонсировал о новой разработке установки для монтажа медной проволокой модели IConn [14].

При сборке приборов методом "шарик-клин" обычно используется формирующий газ, состоящий из 95% азота и 5% водорода, который подается в зону образования шарика для предотвращения его окисления и получения шариков правильной формы (рис.3). Скорость подачи формирующего газа в зону образования шарика имеет важное значение в получении шариков стабильного качества (рис.4) для медной проволоки ТСВ1 фирмы Tanaka [15].

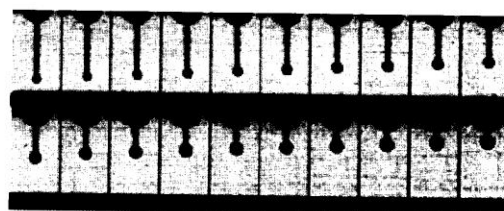


Рис.5. Процесс образования шарика на конце золотой проволоки, снятый видеокамерой модели Motion BLITZ Cube 3-3 с частотой до 120 тыс. кадров/с

Для получения шариков практически сферической формы необходим расход формирующего газа в диапазоне 0,2-0,6 л/мин. Недостаточный или избыточный расход формирующего газа приводит к асимметричным шарикам, непригодным для последующего присоединения [16]. Для исследования процесса образования шарика в настоящее время появились высокоскоростные цифровые камеры, с помощью которых можно наблюдать процесс оплавления конца проволоки (рис.5) [17].

Камера в течение 3 с накапливает видеoinформацию, которая затем анализируется по отдельным кадрам. Аппаратно-программный комплекс цифровой видеорегистрации быстропротекающих процессов на базе этой видеокамеры включает в себя персональный компьютер-ноутбук для хранения, обработки и визуализации информации и пакет специального программного обеспечения компании Mikrotop GmbH. Это позволяет быстро организовать и провести необходимые исследования на действующем оборудовании даже в условиях цеха.

При сборке приборов методом "шарик-клин" интерес представляет микротвердость образуемых шариков. Проведенные измерения твердости присоединенных медных шариков на микротвердомере Leica при нагрузке 5 г показали, что микротвердость шарика больше, чем у исходной проволоки: 230 для шарика и 194 для про-

Таблица 3. Режимы термовзвучкового присоединения золотой и медной проволоки

Параметры процесса	Au 25 мкм, BGA	Cu 25 мкм, BGA	Cu 25 мкм, PLCC
Размер шарика, мкм	60	60	60
Скорость контактирования, мкм/мс	13	19	10
Величина тока, мА	82	67	90
Время присоединения, мс	15	12	15
Контактное усилие, г	15	35	16
Температура, °C	170	170	200



Рис.6. Пример выдавливания Al металлизации медным шариком

волокни по методу Кнуппа. Это может стать, как было отмечено выше, причиной образования кратера (или микротрещины) под сварным соединением. Надо отметить, что исходная микротвердость образованного шарика может незначительно отличаться от микротвердости самой проволоки и составляет 100-110 HV, но после процесса присоединения медного шарика к контактной площадке кристалла микротвердость шарика увеличивается. Это может привести к выдавливанию Al металлизации контактной площадки в процессе термозвукового присоединения (рис.6) [11]. Кроме того, высокая твердость медного шарика вызывает развитие внутренних механических напряжений в термозвуковом соединении, величина которых может быть эмпирически оценена как [18]:

$$\sigma_{0,2} = 3,27 \cdot HV \cdot 0,1^n$$

Исследования в области присоединения медной проволоки в настоящее время посвящены в большей степени методу "шарик-клин" как наиболее производительному и возможно более перспективному методу. Однако в отдельных случаях сборки, например, дискретных приборов можно использовать метод "клин-клин".

Режимы присоединения золотой и медной проволоки методом "шарик-клин" к контактным площадкам с Al металлизацией в двух типах интегральных микросхем BGA и PLCC приведены в табл.3 [9]. Авторы исследовали процесс присоединения медной проволоки диаметром 50 мкм к алюминиевым площадкам кристалла транзистора и к золоченым внешним выводам его корпуса. При сборке использовалась медная проволока фирмы Negeaus диаметром 50 мкм с разрывным

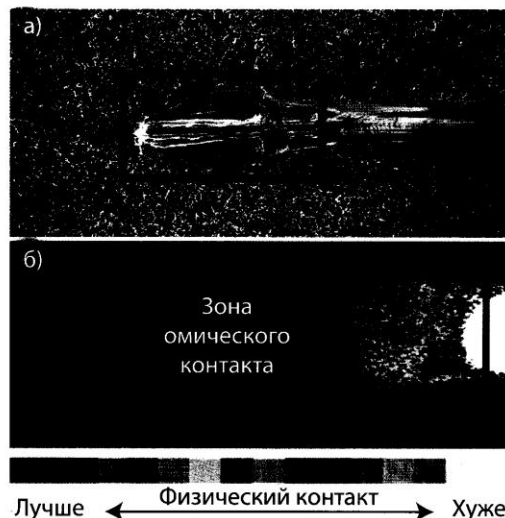


Рис.7. Внешний вид соединения медной проволокой (а) и диаграмма фотоакустического сканирования сварных соединений (б)

усилием 30-33 г и относительным удлинением 20-25%. С целью изучения возможности исключения использования формирующего газа присоединения производились методом "клин-клин" инстру-

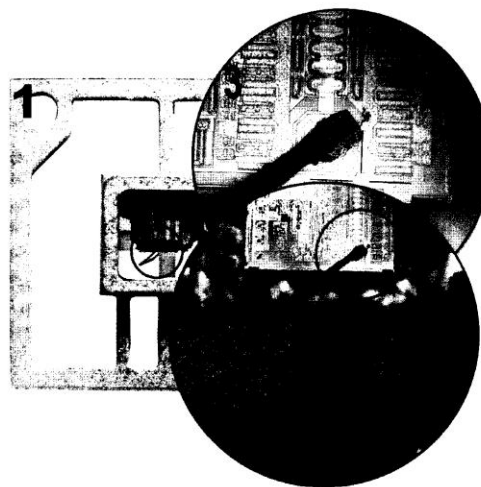


Рис.8. Транзистор в сборке: 1 – выводная рамка транзистора, 2 – медное присоединение кристалл-внешний вывод, 3 – место сварки на кристалле

ментом типа КУТ-32-50-130-15. Разварка проволоки осуществлялась на установке ЭМ-4320 с новым разработанным УЗ-преобразователем с частотой резонанса 94,2 кГц [19]. Температура подогрева зоны сварки составляла 160°C, нагрузка на сварочный инструмент – 55–60 г. На рис.7 показаны внешний вид получаемых соединений и диаграмма фотоакустического сканирования сварной точки.

Разрушающий контроль тянущим усилием перемычек показал прочность 25–30 г без отрыва сварных точек от места сварки. Диаграмма фотоакустического сканирования сварного соединения подтверждает результаты разрушающих тестов на отрыв. Деформация сварных соединений не превышала 55–60%. Время сварки составило 100 мс, а подводимая мощность от ультразвукового генератора не превышала 1 Вт. Внешний вид одного из собранных образцов транзисторов показан на рис.8.

Таким образом, в технологии присоединения медной проволоки при сборке приборов средней мощности используется медная проволока диаметром 40–50 мкм. При сборке методом "шарик-клин" при формировании шарика необходимо использование формир-газа, состоящего преимущественно из смеси азота 95% и водорода 5%. При этом для получения шарика правильной формы большое значение имеет скорость подачи формир-газа в зону образования шарика. Использование ультразвуковых систем повышенной частоты дает положительный эффект в технологии присоединения медной проволоки диаметром 50 мкм методом "клин-клин" при температуре рабочей зоны 160°C без использования формир-газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Harman G.G.** Wire bonding in microelectronics. N.Y.: McGraw Hill 3-d edition, 2010, p.68–69.
2. **Онегин Е.Е., Зенькович В.А., Битно Л.Г.** Автоматическая сборка ИС. – Минск: Высшая школа, 1990.
3. **Шмаков М.** Микросварка при производстве микросборок и гибридных интегральных микросхем. – Технологии в электронной промышленности, 2006, №5, с.68–74.
4. **Deley M., Levine L.** The emergence of high volume copper ball bonding // Kulicke&Soffa technical library on www.kns.com
5. Материалы в приборостроении и автоматике: справочник/Ю.М. Пятин и др./Под ред. Ю.М.Пятин. – М.: Машиностроение, 1982.
6. Study of 6 mil Cu Wire Replacing 10–15 mil Al Wire for Maximizing Wire-Bonding Process on Power ICs / Y.Jiang, R.Sun, Y.Yu, Z.Wang. – IEEE Transaction on Electronics Packaging Manufacturing, 2010, v.33, №2, p.135–142.
7. Characterization of intermetallic growth in copper and gold ball bonds on aluminium metallization / F.W.Wulff, C.D.Breach, D.Stephan, Saraswati, K.J.Dittmer // Kulicke&Soffa technical library on www.kns.com
8. **Buschbeck M.** Well wired for the future. – European Semiconductor, December 2004, January 2005, v.26, №12, p.27–30.
9. Further characterization of intermetallic growth in copper and gold ball bonds on aluminium metallization / F.W.Wulff, C.D. Breach, D.Stephan, Saraswati, K.J Dittmer, M.Garnier // Kulicke&Soffa technical library on www.kns.com
10. Concurrent optimization of crescent bond pull force and tail breaking force in thermosonic Cu wire bonding process / J.Lee, M.Mayer, Y.Zhou, S.J.Hong, J.T.Moon. – IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing, July 2009, v.32, №3, p.157–163.
11. **Breach C.D.** What is the future of bonding wire? Will copper entirely replace gold? // Gold Bulletin Vol.43 №3, 2010 pp.150–168/
12. www.gaisertool.com
13. www.smallprecisiontools.com
14. IConn High Performance Wire Bonder // Kulicke&Soffa technical library on www.kns.com
15. www.tanaka-bondingwire.com// guide_Cu.pdf
16. Modeling energy transfer to copper wire for bonding in an inert environment / Hong Meng Ho, Jonathan Tan, Yee Chen Tan, Boon Hoe Toh, Pascal Xavier // Kulicke&Soffa technical library on www.kns.com
17. **Ланин В.Л., Томаль В.С., Петухов И.Б., Волкенштейн С.С.** Скоростная видеосъемка формирования шарика в установках термозвуковой микросварки. // Современные информационные и электронные технологии. Труды 11 Междунар. научно-практ. конф. – Одесса, 24–28 мая 2010 г., т.2, с.43.
18. Investigation of Factors Affecting Bonded Ball Hardness on Copper Wire Bonding / Н.М.Но, Y.C.Tan, W.C.Tan, Н.М.Goh, В.Н.Toh, J.Tan, Z. w. Zhong // Kulicke&Soffa technical library on www.kns.com.
19. **Ланин В.Л., Петухов И.Б., Волкенштейн С.С.** Термозвуковое присоединение медной проволоки в полупроводниковых приборах с использованием ультразвука повышенной частоты. // Современные средства связи. Труды XIV Междунар. научн.-техн. конф. 28–30 сентября. – Минск, ВГКС, 2010, с.68.