

Проблемы формирования микросварных соединений с повышенной плотностью монтажа

Владимир ЛАНИН,
профессор
vlanin@bsuir.by
Игорь ПЕТУХОВ
petuchov@kbtcm.by

В статье предложены пути решения проблем формирования микросварных соединений с повышенной плотностью монтажа. Они включают многоуровневое расположение выводов в корпусе, применение микроинструмента с утонением рабочего торца и прецизионных устройств формирования шарика, обеспечивающих воспроизводимость качества соединений.

Введение

Микроминиатюризация электронных компонентов и создание функционально сложных микроэлектронных устройств, в частности 3D интегральных микросхем и многокристальных модулей, привели к возникновению особых проблем в области формирования контактных соединений. Увеличение плотности активных элементов на кристалле в среднем на 75% в год вызывает увеличение количества выводов на корпусах на 40% [1]. Это обуславливает постоянно растущий спрос на новые методы корпусирования, которые позволяют повысить плотность межсоединений в электронных модулях. Высокую функциональную сложность и степень интеграции невозможно реализовать без принципиального совершенствования системы контактных соединений.

Новым подходом в повышении плотности упаковки компонентов является 3D-интеграция, потенциальные преимущества которой заключаются в уменьшении размеров изделий электроники, сокращении длины межсоединений за счет замены длинных горизонтальных связей на короткие вертикальные и снижении энергопотребления. 3D-структура может иметь в своем составе пассивные компоненты, микроэлектромеханические системы, оптические компоненты и др. Объединение этих компонентов в одном корпусе существенно снижает массо-

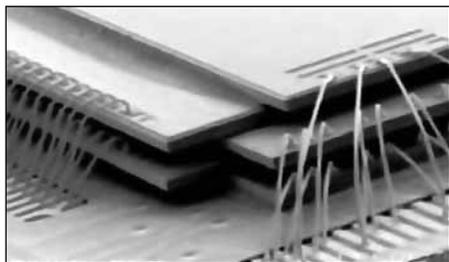


Рис. 1. Проволочный микромонтаж в 3D-структуре

габаритные характеристики изделия и его стоимость. Однако наличие большого числа проволочных перемычек на различных уровнях (рис. 1) усложняет монтаж и не способствует повышению надежности изделия [2].

Термозвуковая микросварка (ТЗС) проволочных выводов в приборах с повышенной плотностью монтажа означает в первую очередь уменьшенный размер контактных площадок на кристалле 60–80 мкм при малом шаге между соседними контактными

площадками (до 40–50 мкм) и числе выводов более 100. Приборы с размерами контактных площадок менее 60 мкм относятся к сверхплотному монтажу [3]. Совершенно очевидно, что при сборке подобных приборов необходимо использовать проволоку малого диаметра (≤ 25 мкм), а это, в свою очередь, требует обеспечения надежного процесса присоединения в связи с уменьшением площади сварного соединения (рис. 2) и утонения торца капилляра (рис. 2б).

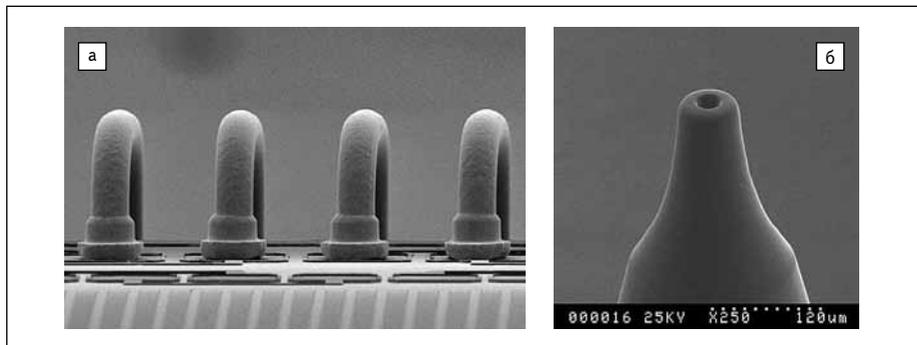


Рис. 2. Микросварные соединения (а) и торец капилляра (б) при монтаже повышенной плотности

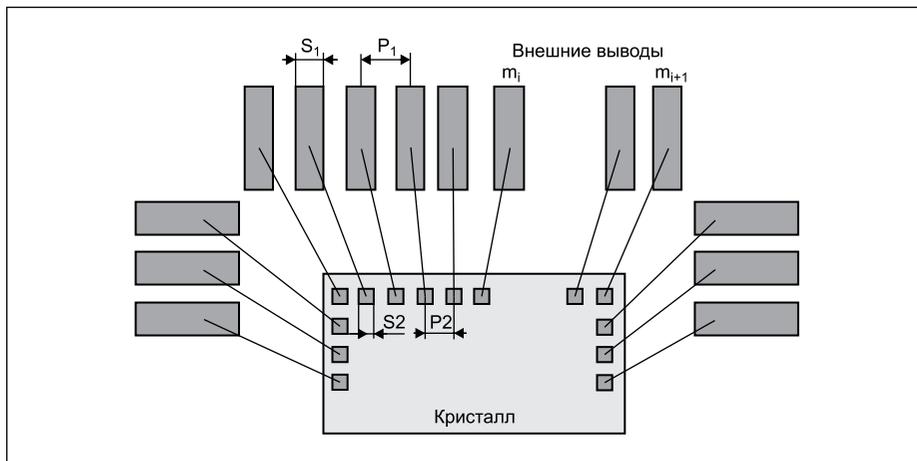


Рис. 3. Схема проволочных межсоединений между контактными площадками кристалла и корпуса прибора



Рис. 4. Образование пустот между золотым шариком на золотой проволоке диаметром 20 мкм и алюминиевой контактной площадкой кристалла. Изображения получены: а) на оптическом микроскопе; б) на сканирующем электронном микроскопе

Следующая проблема заключается в сложности формирования прямолинейных петель при достаточно большой их длине.

Рассмотрим стандартную схему сборки типового прибора, она показана на рис. 3.

Вычислим длину m_{i-1} вывода, который расположен правее m_1 -го вывода. На рис. 3 видно, что вывод повернут на некоторый угол по часовой стрелке относительно вывода m_1 . Длину m_{i-1} -го вывода можно вычислить как гипотенузу треугольника, образованного при его переносе на место m_1 вывода на кристалле, пользуясь следующей формулой:

$$L_n = \sqrt{((n-1) \times P_2 - (n-1) \times P_1)^2 + L^2}, \quad (1.1)$$

где n — число выводов; P_1 — шаг выводов на кристалле; P_2 — шаг выводов корпуса прибора; L — длина первого вывода; L_n — длина n -го вывода.

При значениях $n = 30$, $P_1 = 0,09$, $P_2 = 0,3$ и $L = 1,5$ получаем (1.2).

Формирование прямолинейных выводов такой длины проволокой уменьшенного диаметра является сложной задачей. Для ее решения необходимы, во-первых, точные интерполированные движения микроинструмента в системе координат X - Y - Z , а во-вторых, применение проволоки с необходимыми упругими свойствами. Согласно соотношению (1) основной вклад в удлинение вывода вносит разница в шаге выводов корпуса и кристалла. Конструктивно выполнить ширину выводов корпуса менее 100 мкм очень сложно, да и нецелесообразно из-за невозможности обеспечить необходимую прочность соединения «встык» при его малой площади. Возможным решением проблемы могут быть как многоуровневое расположение выводов корпуса, так и шахматное расположение контактных площадок на кристалле.

Известно, что при присоединении золотой проволоки к алюминиевым контактным площадкам кристалла с помощью термозвуковой микросварки образуются интерметаллиды золота и алюминия, снижающие надежность соединений. С уменьшением диаметра проводников, а соответственно —

$$L_n = \sqrt{((30-1) \times 0,3 - (30-1) \times 0,09)^2 + 1,5^2} = 6,2 \text{ мм.} \quad (1.2)$$

Таблица 1. Толщина алюминиевой металлизации на контактной площадке кристалла и толщина слоя интерметаллидов для различных проволок при ТЗС

Материал проволоки	Диаметр проволоки, мкм	Толщина Al металлизации до сварки, мкм	Толщина Al металлизации после сварки, мкм	Толщина слоя интерметаллидов в соединении, мкм
Au	15	1,2	0,7–0,9	0,2–0,4
Au	20	1,2	0,3–0,5	0,3–0,5
Au	25	1,2	0,5	0,3–0,5
Au	50	3	1,7	0,5–0,7
Au	75	3	1,5	0,5–0,8
Cu	25	1,2	0,8–1	0,1–0,2

и диаметра шариков, размер пустот значительно увеличивается при термоциклировании в течение 192 часов при температуре +175 °С по сравнению с проволокой большего диаметра (≥ 25 мкм) [4]. В отдельных случаях пустоты росли настолько интенсивно, что происходил полный отказ соединения (рис. 4).

Кроме того, что рост интерметаллидов влияет на прочность соединения, значительно сокращается и толщина алюминиевого покрытия площадки, как показано в таблице 1 [4]. В то же время при соединении медной проволокой толщина слоя интерметаллидов незначительна (по сравнению с золотой проволокой).

Существует еще одна проблема, которая может снизить выход годных изделий, — это следы пробников на контактных площадках кристалла. Так, при соотношении площади зондового отпечатка к площади сварного соединения более 20% растет число соединений с нулевой прочностью («отлипы») при тесте на отрыв [5]. Одним из способов достижения высокой воспроизводимости сварных соединений при термозвуковой сварке с использованием проволоки уменьшенного диаметра (≤ 25 мкм) при сборке приборов с повышенной плотностью монтажа является применение ультразвуковых систем повышенной частоты (≥ 100 кГц) [6]. При этом обеспечивается сокращение времени сварки за счет интенсивного размягчения свариваемых материалов и лучшей передачи ультразвуковой энергии.

Оценка минимальных размеров контактных площадок для термозвуковой микросварки методом «шарик-клин»

В идеале центр шарика на контактной площадке квадратной или прямоугольной формы должен находиться на точке пересечения диагоналей контактной площадки. В действительности сварная точка может быть смещена из-за ограничений по точности приводов установки по координатам X , Y , погрешности системы машинного зрения и разброса в диаметре присоединенного шарика, в том числе его асимметрии. Условное

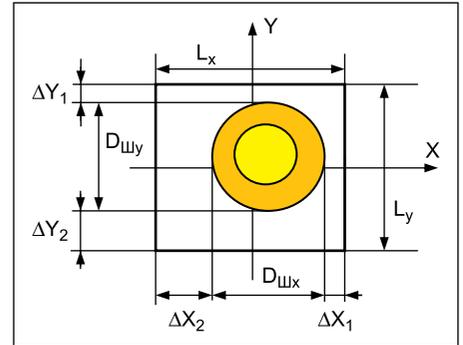


Рис. 5. Условное положение шарика на контактной площадке: $D_{шx}$ — размер шарика по оси X ; $D_{шy}$ — размер шарика по оси Y ; L_x, L_y — размеры контактной площадки; $\Delta X_1, \Delta X_2$ — отклонение шарика по координате X ; $\Delta Y_1, \Delta Y_2$ — отклонение шарика по координате Y

положение шарика на контактной площадке показано на рис. 5. Положение шарика на контактной площадке ограничивается размерами контактной площадки, за пределы которых он не должен выступать.

Известно, что коэффициент точности K_T технологического процесса формирования соединения вычисляется из следующего соотношения:

$$K_T = 2\delta/6\sigma, \quad (2)$$

где δ — половина поля допуска; σ — среднеквадратичное отклонение от центра контактной площадки.

Учитывая соотношение (2), коэффициент точности по координате X можно записать в следующем виде:

$$K_{Tx} = \frac{L_x - D_{шx} - |\Delta X_1 - \Delta X_2|/2}{6\sigma_x}, \quad (3)$$

где σ_x — стандартное отклонение положения шарика от центра контактной площадки по координате X ; L_x — размер контактной площадки по координате X ; $D_{шx}$ — средний размер деформированного шарика по координате X .

Аналогично для коэффициента точности по координате Y имеем:

$$K_{Ty} = \frac{L_y - D_{шy} - |\Delta Y_1 - \Delta Y_2|/2}{6\sigma_y}, \quad (4)$$

где σ_y — стандартное отклонение положения шарика от центра контактной площадки по координате Y ; L_y — размер контактной площадки по координате Y ; $D_{Шy}$ — средний размер деформированного шарика по координате Y .

Из соотношений (3) и (4) следует, что коэффициенты точности зависят как от разброса диаметра деформированных шариков на контактных площадках, так и от точности позиционирования по координатам X , Y и системы машинного зрения. Проведем оценку возможностей установки ЭМ-4260 для ТЗС приборов с контактными площадками на кристалле 80×80 мкм и золотой проволокой диаметром 25 мкм, используя данные типового процесса сборки приборов (табл. 2).

Таблица 2. Результаты контроля точности позиционирования шарика на контактных площадках размером 80×80 мкм

$D_{Шx}$ мкм	$D_{Шy}$ мкм	$ \Delta X_1 - \Delta X_2 /2$ мкм	$ \Delta Y_1 - \Delta Y_2 /2$ мкм	$S_{сг}$ мкм	$S_{сy}$ мкм
65,3	66,5	2,6	2,7	0,98	1,1
K_{Tx}			2,08		
K_{Ty}			1,63		

Исходный размер шарика был установлен как $2,2D_{пров.}$, где $D_{пров.}$ — диаметр проволоки. Полученный коэффициент точности — больше 0,95, и процесс стабилен при сборке приборов с выходом годных не менее 98,7%. Используя соотношения (3) и (4), нетрудно убедиться в том, что для контактных площадок 60×60 мкм необходимо уменьшить диаметр деформированных шариков по крайней мере до 48 мкм. При этом $K_{Tx} = 1,61$ и $K_{Ty} = 1,42$.

Другим возможным решением является использование проволоки уменьшенного диаметра, например 20 мкм. При этом исходный шарик будет иметь стандартный диаметр по отношению к диаметру проволоки, а именно $2D_{пров.}$ (40 мкм).

Однако разварка кристаллов для кредитных карточек на ленте Heraeus (Германия) с размерами контактных площадок кристаллов 80×80 мкм на установке ЭМ-4060 П не увенчалась успехом, поскольку точностные параметры установки (значения $|\Delta X_1 - \Delta X_2|/2$ и $|\Delta Y_1 - \Delta Y_2|/2$) составили порядка 7, что не позволило обеспечить стабильность процесса из-за выхода сварной точки за границы контактной площадки. При этом коэффициенты K_{Tx} и K_{Ty} не превысили 0,8.

$$FAB = \sqrt[3]{1,5H^2 \times (H - WD) + \frac{CD^3 - H^3}{4 \operatorname{tg}(0,5CA)} + 1,5MBD^2 \times MBH}, \quad (5.1)$$

$$FAB = \sqrt[3]{1,5 \times 38^2 \times (38 - 25) + \frac{68^3 - 38^3}{4 \operatorname{tg}(0,5 \times 90)} + 1,5 \times 65^2 \times 15} = 57,3 \text{ мкм}. \quad (5.2)$$

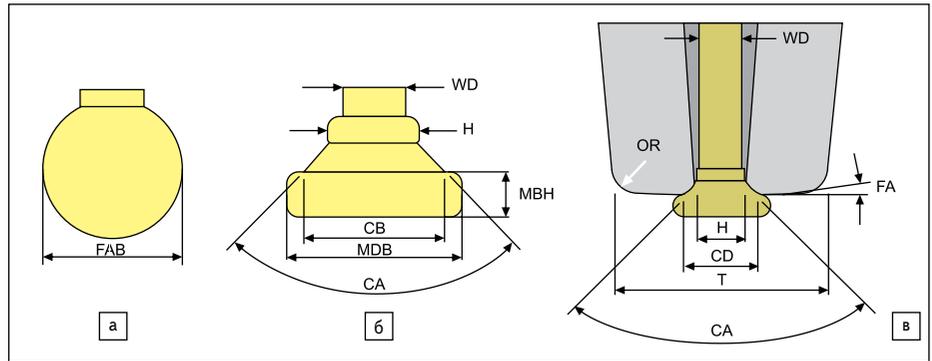


Рис. 6. а) Форма исходного шарика до сварки; б) профиль деформированного шарика после присоединения; в) вид рабочего торца капилляра с проволокой на позиции присоединения; FA — угол торца капилляра; OR — внешний радиус; T — диаметр рабочего торца

Методика выбора капилляра для термовзвучковой микросварки с повышенной плотностью монтажа

Выбор капилляра для термовзвучковой сварки имеет большое значение, и при этом необходимо выполнять определенные требования. На рис. 6 показаны условные обозначения, которые приведены в большинстве зарубежных каталогов фирм-производителей микроинструментов, например SPT (Швейцария).

Для определения требуемого диаметра шарика под выбранный из каталога капилляр можно воспользоваться следующим соотношением [7] (5.1), где H — диаметр отверстия капилляра; WD — диаметр проволоки; CD — диаметр внутренней фаски; CA — угол внутренней фаски; MBD — диаметр деформированного шарика; MBH — высота деформированного шарика.

Рассчитаем необходимый диаметр исходного шарика для проволоки диаметром 25 мкм, при среднем диаметре деформированного шарика 65 мкм и высоте деформированного шарика 15 мкм для присоединения к контактным площадкам кристалла размером 80×80 мкм. Из каталога SPT выбираем стандартный инструмент типа UTF-38HG. Подставляя его данные в выражение (5), получим (5.2).

Отношение полученного диаметра шарика к диаметру проволоки составляет $57,3/25 = 2,29$, что является стандартным. Полученный результат полезен для установки необходимого режима работы блока формирования шарика, а именно тока разряда и его длительности.

Для оптимизации процесса нужно оценить влияние каждого параметра геометрии торца капилляра:

- Для свободного скольжения проволоки диаметр отверстия капилляра выбирают по отношению к диаметру проволоки как 1,2–1,4. При сборке приборов с повышенной плотностью монтажа при уменьшении рабочего торца отношение диаметра отверстия к диаметру проволоки уменьшают до 1,2.
- Диаметр внутренней фаски CD и угол CA определяют форму деформированного шарика. Это связано с растеканием материала при деформации объема исходного шарика. Объем деформированного шарика состоит из трех частей (рис. 6б): верхней цилиндрической части, определяемой диаметром отверстия H ; конусной части, которая располагается ниже, в результате воздействия внутренней фаски CD ; угла CA , типовое значение которого составляет от 70° до 120° . Чем больше угол CA , тем больше диаметр деформированного шарика. Поэтому для сборки приборов с повышенной плотностью монтажа необходимо выбирать капилляры с углом внутренней фаски от 70° до 90° .

При уменьшенном размере контактных площадок и малом шаге между ними для того, чтобы торец капилляра не касался соседних соединений и перемычек, используют капилляры с утоненным наконечником. При подборе такого капилляра необходимо учитывать диаметр торца T , точнее $1/2T$ (рис. 7а), определяемый шагом между центрами контактных площадок на кристалле (параметр FPP на рис. 7б). Поскольку утонение торца представляет собой конус, величина угла конуса определяет высоту перемычки, при которой капилляр не касается соседней перемычки.

На рис. 7а видно, что при определенной высоте перемычки h возможно касание с торцом капилляра. Учитывая, что угол торца капилляра — θ , минимальный шаг FPP между центрами сварных точек может быть вычислен как:

$$FPP = T/2 + h \times \operatorname{tg}(\theta/2) + WD/2. \quad (6)$$

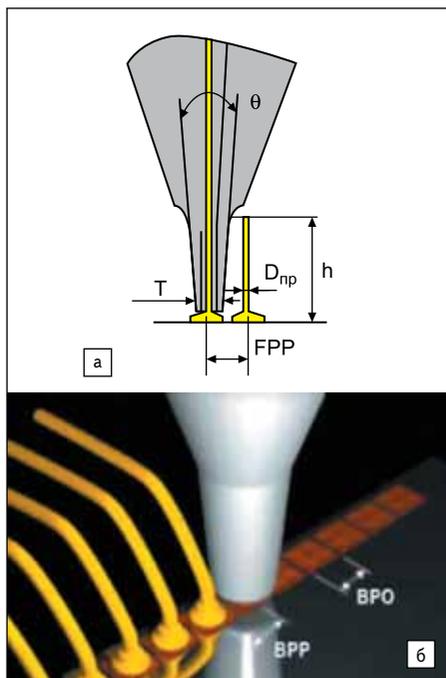


Рис. 7. Схема положения (а) капилляра и его внешний вид (б) для плотного монтажа:
 Т — диаметр торца капилляра;
 θ — угол утоненного наконечника;
 $D_{\text{пр}}$ — диаметр проволоки;
 FPP — шаг между центрами сварки;
 h — высота перемычки

Заключение

Обозначим пути решения проблем, возникающих при сборке приборов с повышенной плотностью монтажа:

- При ТЗС с малым шагом контактных площадок проволокой малого сечения (≤ 25 мкм) необходимы приборы с многоуровневым расположением выводов (такая конструкция обеспечивает максимальную длину формируемых перемычек — не более 4 мм) и с шахматным расположением контактных площадок на кристалле.

- Следует использовать микроинструмент с утонением рабочего торца и оптимальными геометрическими параметрами для конкретного диаметра проволоки.
- Нужно применять прецизионные устройства формирования шарика, преимущественно отрицательной полярности, обеспечивающие воспроизводимый диаметр образуемых шариков.
- Следует применять ультразвуковой генератор с точной регулировкой подводимой энергии и поддержанием ультразвуковой системы на резонансной частоте.
- Нужно учитывать, что при увеличении толщины Al покрытия контактной площадки надежность прибора при термоциклировании становится больше. ■

Литература

1. Медведев А., Мылов Г. Будущее технологий электрических межсоединений в электронном приборостроении // Технологии в электронном приборостроении. 2012. № 6.
2. Нисан А. Восемь тенденций, которые изменят электронику // Технологии в электронной промышленности. 2011. № 2.
3. Zhong Z., Goh K. S. Analysis and experiments of ball deformation for ultra fine pitch wire bonding // Journal of Electronics Manufacturing. 2001. Vol. 10. No 4.
4. Murali S., Skikanth N., Vath C. J. Effect of wire diameter on the thermosonic bond reliability // Microelectronics Reliability. 2006. No 46.
5. Yao Y. F., Xiong Z. P., Gu X., Chua K. H. Assembly process development of 50 μm fine pitch wire bonded devices // Electronic Components and Technology Conference. 2004.
6. Ланин В., Петухов И., Мордвинцев Д. Повышение качества микросварных соединений в интегральных схемах с использованием ультразвуковых систем повышенной частоты // Технологии в электронной промышленности. 2010. № 1.
7. www.smallprecisiontools.com