

# Проблемы формирования микросварных соединений с повышенной плотностью монтажа

**Владимир ЛАНИН,**  
профессор  
vlanin@bsuir.by  
**Игорь ПЕТУХОВ**  
petuchov@kbtm.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-

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 ( $\leq 25$  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).

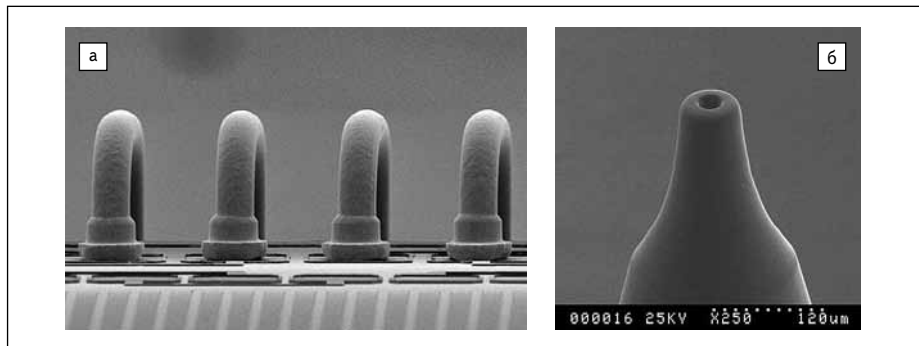


Рис. 2. Микросварные соединения (а) и торец капилляра (б) при монтаже повышенной плотности

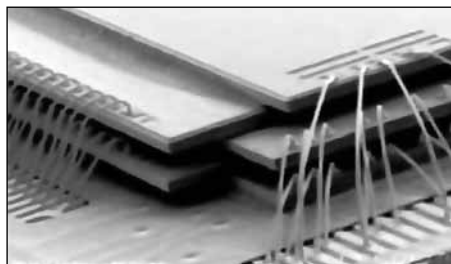


Рис. 1. Проволочный микромонтаж в 3D-структуре

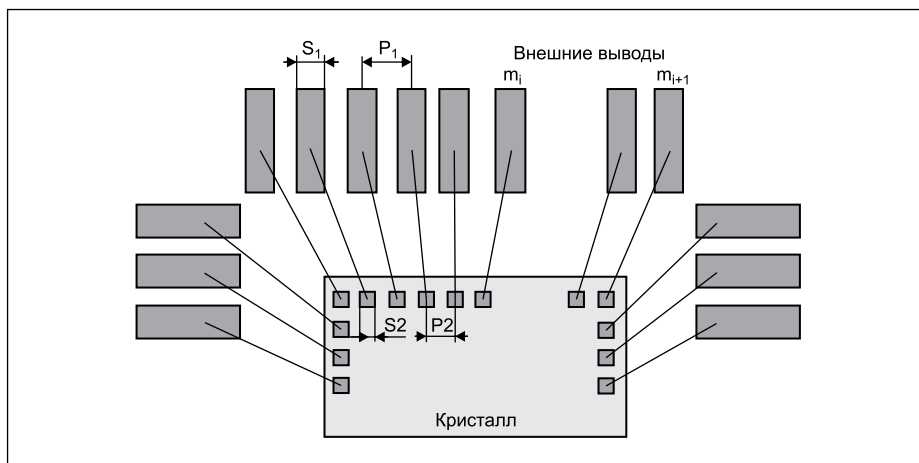


Рис. 3. Схема проволочных межсоединений между контактными площадками кристалла и корпуса прибора



**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  $m_i$ -го вывода. На рис. 3 видно, что вывод повернут на некоторый угол по часовой стрелке относительно вывода  $m_i$ . Длину  $m_{i-1}$ -го вывода можно вычислить как гипотенузу треугольника, образованного при его переносе на место  $m_i$  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 ТЭС

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

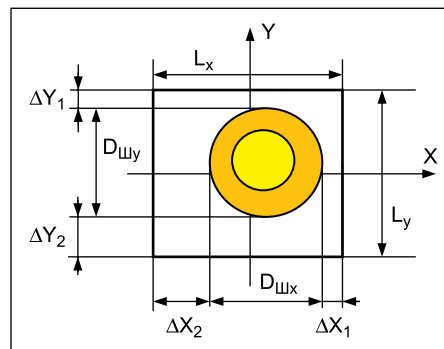
и диаметра шариков, размер пустот значительно увеличивается при термоциклировании в течение 192 часов при температуре +175 °С по сравнению с проволокой большего диаметра ( $\geq 25$  мкм) [4]. В отдельных случаях пустоты росли настолько интенсивно, что происходил полный отказ соединения (рис. 4).

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 ( $\leq 25$  мкм) при сборке приборов с повышенной плотностью монтажа является применение ультразвуковых систем повышенной частоты ( $\geq 100$  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  $\delta$  — половина поля допуска;  $\sigma$  — 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  $\sigma_x$  — 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  $\sigma_y$  — стандартное отклонение положения шарика от центра контактной площадки по координате  $Y$ ;  $L_y$  — размер контактной площадки по координате  $Y$ ;  $D_{Ш,y}$  — 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  $80 \times 80$  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  $80 \times 80$  мкм

$D_{Ш,x}$ мкм	$D_{Ш,y}$ мкм	$ \Delta X_1 - \Delta X_2 /2$ мкм	$ \Delta Y_1 - \Delta Y_2 /2$ мкм	$S_{ср}$ мкм	$S_{y}$ мкм
65,3	66,5	2,6	2,7	0,98	1,1
$K_{Tx}$			2,08		
$K_{Ty}$			1,63		

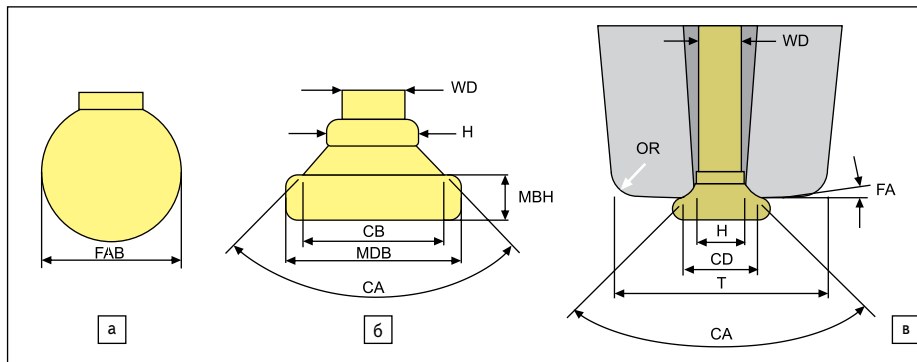
Исходный размер шарика был установлен как  $2,2D_{пров.}$ , где  $D_{пров.}$  — диаметр проволоки. Полученный коэффициент точности — больше 0,95, и процесс стабилен при сборке приборов с выходом годных не менее 98,7%. Используя соотношения (3) и (4), нетрудно убедиться в том, что для контактных площадок  $60 \times 60$  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  $80 \times 80$  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  $80 \times 80$  мкм. Из каталога SPT выбираем стандартный инструмент типа UTF-38HG. Подставляя его данные в выражение (5.1), 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.

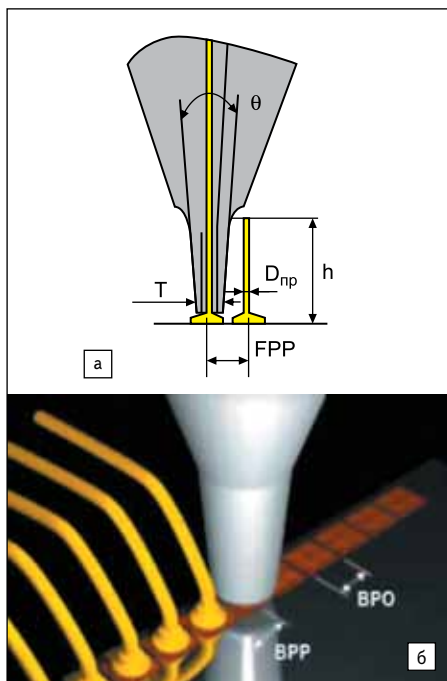
Для оптимизации процесса нужно оценить влияние каждого параметра геометрии торца капилляра:

- 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  $70^\circ$  до  $120^\circ$ . 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  $70^\circ$  до  $90^\circ$ .

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 выборе 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 —  $\theta$ , 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:  
 T — диаметр торца капилляра;  
 $\theta$  — 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 ( $\leq 25$  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  $\mu\text{m}$  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](http://www.smallprecisiontools.com)