

Д. т. н. В. Л. ЛАНИН<sup>1</sup>, И. Б. ПЕТУХОВ<sup>2</sup>

Беларусь, г. Минск, <sup>1</sup>БГУИР, <sup>2</sup>УП «КБТЭМ-СО» ГНПО «Планар»

E-mail: vlanin@bsuir.by, petuchov@kbtem.by

## ПОЛУЧЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ ТЕРМОЗВУКОВОЙ МИКРОСВАРКОЙ В 3D ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМАХ

*Рассмотрены процессы получения микросварных соединений повышенной плотности в 3D интегральных схемах термозвуковой микросваркой, включающие использование повышенных частот ультразвука, применение микроинструмента с утонением рабочего торца и прецизионных устройств формирования шарика, обеспечивающих воспроизводимость качества соединений. При малом шаге расположения контактных площадок необходимо использовать проволоку малого сечения (25 мкм) в конструкциях приборов с многоуровневым расположением выводов и шахматным расположением контактных площадок на кристалле, когда максимальная длина формируемых перемычек составляет не более 4–5 мм.*

*Ключевые слова:* микросварка, термозвук, соединения, интегральные микросхемы.

Микроминиатюризация электронных компонентов и создание функционально сложных микроэлектронных устройств, в частности 3D интегральных микросхем и многокристаллических модулей, вызвала особые проблемы в области формирования микросварных соединений. В 3D-сборках за счет сокращения длины межсоединений и замены длинных горизонтальных связей на короткие вертикальные повышается плотность упаковки компонентов и рабочая частота устройств. Однако наличие большого числа проволочных перемычек на различных уровнях усложняет монтаж и не способствует повышению надежности изделия [1].

Для формирования микросварных соединений повышенной плотности, когда размер контактных площадок на кристалле составляет 60×60 мкм и менее, шаг между соседними контактными площадками 40–50 мкм, а число выводов корпуса более 100 [2], совершенно очевидно, что необходимо использовать проволоку малого диаметра ( $\leq 25$  мкм), а монтаж вести преимущественно термозвуковой микросваркой методом «шарик – клин» [3].

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) [4]. При этом обеспечивается сокращение времени сварки за счет интенсивного размягчения свариваемых материалов и лучшей передачи ультразвуковой энергии.

В настоящее время для обеспечения надежных межсоединений между кристаллом и выводной рамкой методом «шарик – клин» используют золотую проволоку (до 95% изготавливаемых микросхем в мире) [3]. Стабильность диаметра и симметрия образуемых электроискровым методом шариков определяют качество получаемых сварных соединений встык шариком на кристалле. Так, для контактной площадки размерами 60×60 мкм при микросварке золотой проволокой диаметром 25 мкм с шагом соединений 60 мкм необходимо обеспечить исходный диаметр оплавленного шарика 1,7–1,8 от диаметра проволоки (что меньше стандартного значения 2–2,5 диаметра проволоки), т. е. в диапазоне 42,5–45 мкм, для обеспечения размера деформированного шарика от 52,5 до 55 мкм [5]. Разброс значений диаметра исходных шариков  $\pm 2,5$  мкм с учетом погрешности позиционирования сварочной головки  $\pm 4$  мкм может привести к выходу сварного соединения за пределы контактной площадки и повреждению топологии кристалла. Поскольку разброс по деформации соединений шариком встык на кристалле сильно зависит от геометрии рабочего торца капилляра, необходимо при выборе последнего учитывать паспортные отклонения его размеров.

Целью настоящей работы является определение условий формирования микросварных соединений повышенной плотности в 3D интегральных схемах термозвуковой микросваркой, включая оценку минимальных размеров контактных площадок на кристалле, выбор инструмента с утонением рабочего торца и оценка влияния па-

раметров геометрии рабочего торца на воспроизводимость качества соединений.

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

Качество микросварных соединений может быть обеспечено, если центр шарика находится в точке пересечения диагоналей квадратной или прямоугольной контактной площадки на кристалле, а сама сварная точка не выходит за ее пределы. В действительности же сварная точка может быть смещена из-за ограничений по точности приводов установок по координатам  $X-Y$ , погрешности машинного зрения и разброса значений диаметра присоединенного шарика, а также его асимметрии. Положение шарика на контактной площадке ограничено ее размерами (рис. 1).

Известно [6], что коэффициент точности технологического процесса формирования соединения вычисляется как

$$K_T = \frac{\Delta}{6\sigma}, \tag{1}$$

где  $\Delta, \sigma$  — соответственно, допускаемое и среднеквадратичное отклонения от центра контактной площадки.

Учитывая соотношение (1), формулу для коэффициента точности по координате  $X$  можно записать в следующем виде:

$$K_{TX} = \frac{L_x - D_{шX} - |\Delta X_1 - \Delta X_2|/2}{6\sigma_x}. \tag{2}$$

Входящие сюда величины относятся к координате  $X$  и означают:

$D_{шX}$  — средний размер деформированного шарика;

$|\Delta X_1 - \Delta X_2|/2$  — среднее отклонение центра шарика от центра площадки или среднее значение ошибки позиционирования;

$\sigma_x$  — среднеквадратичное отклонение положения центра шарика от центра контактной площадки.

Аналогично для коэффициента точности по координате  $Y$  имеем

$$K_{TY} = \frac{L_y - D_{шY} - |\Delta Y_1 - \Delta Y_2|/2}{6\sigma_y}, \tag{3}$$

где входящие величины означают то же самое, что и в формуле (2), применительно к оси  $Y$ .

Из соотношений (2) и (3) следует, что коэффициенты точности зависят как от разброса значений диаметра деформированных шариков на контактных площадках, так и от отклонений  $\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta Y_1, \Delta Y_2$ , обусловленных погрешностями позиционирования по координатным осям и погрешности системы машинного зрения.

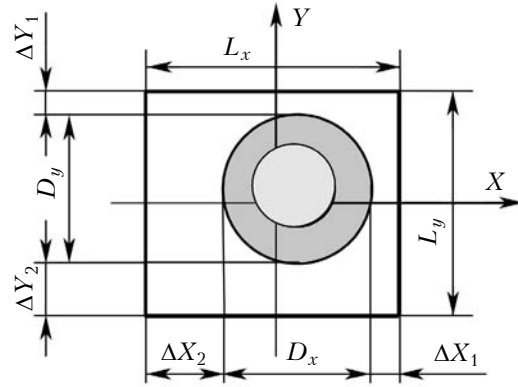


Рис. 1. Условное положение шарика на контактной площадке

(для соответствующих координатных осей указаны:  $D_x, D_y$  — размеры шарика;  $L_x, L_y$  — размеры контактной площадки;  $\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta Y_1, \Delta Y_2$  — размеры, определяющие положение шарика на площадке; меньший круг соответствует сечению проволоки)

Была проведена оценка точности позиционирования шарика золотой проволоки диаметром  $D_{ш}=25$  мкм на контактной площадке размером  $80 \times 80$  мкм на кристалле при монтаже термозвуковой микросваркой на установке ЭМ-4260. Размер исходного шарика устанавливался  $2,2 \times D_{ш}$ . Получены следующие результаты:

$$\begin{aligned} D_{шX} &= 65,3 \text{ мкм}; D_{шY} = 66,5 \text{ мкм}; \\ |\Delta X_1 - \Delta X_2|/2 &= 2,6 \text{ мкм}; |\Delta Y_1 - \Delta Y_2|/2 = 2,7 \text{ мкм}; \\ \sigma_x &= 0,98 \text{ мкм}; \sigma_y = 1,1 \text{ мкм}; \\ K_{TX} &= 2,08; K_{TY} = 1,63. \end{aligned}$$

Как видно, полученные коэффициенты точности больше нормативного значения 1,3 [6], поэтому можно говорить о том, что при сборке приборов процесс стабилен с выходом годных не менее 99,1%. Нетрудно убедиться, что для контактных площадок размером  $60 \times 60$  мкм необходимо уменьшить диаметр деформированных шариков по крайней мере до 48 мкм и тогда получим  $K_{TX}=1,61$  и  $K_{TY}=1,42$ . Другим возможным решением является использование проволоки уменьшенного диаметра, например 20 мкм. При этом диаметр исходного шарика будет стандартным по отношению к диаметру проволоки, а именно  $2 \times D_{ш}$  (40 мкм). Разварка кристаллов кредитных карточек на ленте Heraeus (Германия) с размером контактных площадок  $60 \times 60$  мкм на установке ЭМ-4060П не увенчалась успехом, поскольку погрешность позиционирования установки (значения  $|\Delta X_1 - \Delta X_2|/2$  и  $|\Delta Y_1 - \Delta Y_2|/2$  составляют порядка 8 мкм) не позволила обеспечить стабильность процесса из-за выхода сварной точки за границы контактной площадки. При этом коэффициенты  $K_{TX}$  и  $K_{TY}$  не превышают значения 0,83. Необходимо отметить, что для обеспечения воспроизводимой деформации шариков малого диаметра ( $\leq 2D_{ш}$ ) требуется прецизионная работа ультразвуковой системы, а рабочий

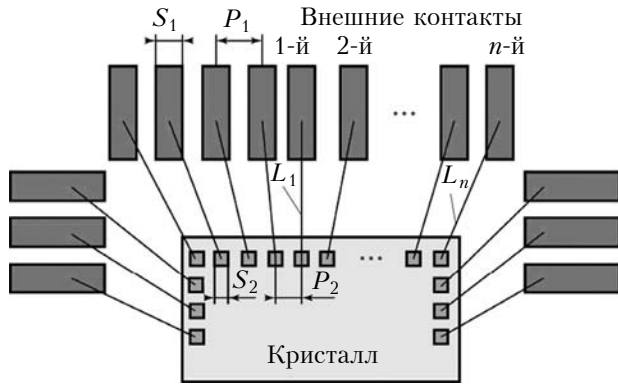


Рис. 2. Схема проволочных межсоединений между контактными площадками кристалла и корпуса прибора

диапазон устанавливаемых параметров микросварки сужается.

При формировании соединений проволокой малого диаметра сложно образовать прямолинейные проволочные выводы при достаточно большой их длине. Рассмотрим для примера верхнюю сторону сборки многовыводного прибора, с равномерно распределенными контактными площадками на корпусе прибора с шагом  $P_1$  и контактными площадками на кристалле с шагом  $P_2$ , как показано на рис. 2.

Рассчитаем максимальную длину, которую может иметь вывод на данной схеме, т. е.  $n$ -й по счету вывод относительно 1-го, контактные площадки которого находятся на вертикальной оси. Рассмотрим на рис. 2 прямоугольную трапецию, боковые стороны которой образованы отрезками длиной  $L_1$  и  $L_n$ , а основания — отрезками между контактными площадками корпуса прибора и контактными площадками на кристалле для этих выводов. Таким образом, длину  $n$ -го вывода можно вычислить как

$$L_n = \sqrt{((n-1)P_2 - (n-1)P_1)^2 + L_1^2}. \quad (4)$$

При  $n=30$ ,  $P_1=0,3$ ,  $P_2=0,09$  и  $L_1=1,5$ , например, получим  $L_n=6,2$  мм.

Формирование выводов такой длины проволокой уменьшенного диаметра является сложной задачей и требует не только точных интерполированных движений микроинструмента в системе координат XYZ, но и проволоки с необходимыми упругими свойствами.

Из соотношения (4) видно, что основной вклад в увеличение длины вывода вносит разница в шаге выводов корпуса и кристалла. С конструктивной точки зрения выполнить ширину контактных площадок корпуса  $S_1$  менее 100 мкм очень сложно и нецелесообразно из-за невозможности обеспечить необходимую прочность соединения «встык» при его малой площади. Возможным решением проблемы является многоуровневое расположение выводов корпуса и шахматное расположение контактных площадок на кристалле.

### Выбор капилляра для соединений повышенной плотности

Выбор геометрии капилляра для термовзвучной сварки имеет большое значение, и при его подборе необходимо учитывать определенные требования. Для определения требуемого диаметра шарика под выбранный из каталога капилляр (рис. 3) фирм-производителей микроинструментов, например SPT (Швейцария), можно воспользоваться следующим соотношением [7]:

$$FAB = (1,5H^2(H-WD) + \frac{CD^3-H^3}{4\text{tg}(0,5CA)} + 1,5 \cdot MBD^2 \cdot MBH)^{1/3}, \quad (5)$$

где  $FAB$  — диаметр исходного шарика;

$H$  — 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 его высоте 15 мкм для присоединения к контактными площадкам кристалла размером  $80 \times 80$  мкм. Из каталога SPT выбираем стандартный инструмент типа UTF-38HG [9] и, подставляя значения его параметров в выражение (5), получим  $FAB=57,3$  мкм.

Отношение полученного диаметра шарика к диаметру проволоки составляет  $57,3/25=2,29$ , что является стандартным значением. Полученный результат позволяет корректно установить необходимые режимы работы блока формирования шарика, а именно ток разряда и его длительность, исходя из технических характеристик

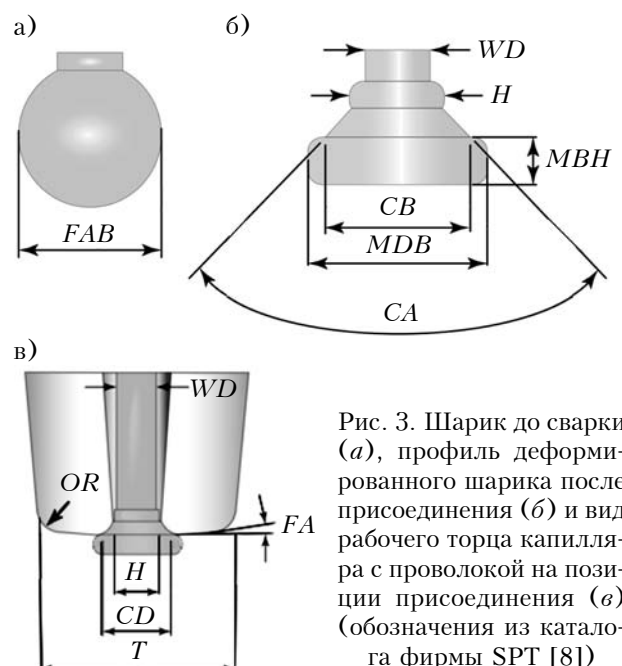


Рис. 3. Шарик до сварки (а), профиль деформированного шарика после присоединения (б) и вид рабочего торца капилляра с проволокой на позиции присоединения (в) (обозначения из каталога фирмы SPT [8])

блока и рекомендаций производителей конкретного типа проволоки.

Рассмотрим влияние геометрии торца капилляра на процесс термозвуковой сварки.

1. Диаметр отверстия капилляра выбирают равным 1,3–1,4 диаметра проволоки для свободного скольжения проволоки. В случае повышенной плотности соединений уменьшаются размеры рабочего торца, и это отношение диаметров уменьшают до 1,2.

2. Диаметр внутренней фаски  $CD$  и ее угол  $CA$  определяют форму и размер деформированного шарика, поскольку с ними связано растекание материала при деформации объема исходного шарика. Деформированный шарик состоит из трех частей (рис. 3, б). Верхняя цилиндрическая часть определяется диаметром отверстия капилляра  $H$ , далее под ней располагается конусная часть, образуемая из-за наличия внутренней фаски и угла  $CA$ , типовое значение которого находится в диапазоне от 70 до 120°. Нижняя часть имеет диаметр  $MDB$ , зависящий от приложенного к капилляру усилия и подводимой ультразвуковой энергии. Чем больше угол  $CA$ , тем больше диаметр деформированного шарика. Поэтому для сборки приборов с повышенной плотностью монтажа необходимо выбирать капилляры с углом внутренней фаски до 90°.

3. Угол торца капилляра  $FA$  в большей степени определяет надежность и прочность второй сварки встык на внешних выводах прибора и выбирается равным 4 или 8°. При пониженной температуре сварки в диапазоне от 140 до 80°С наиболее эффективным является применение капилляров с углом торца 4°. Внешний радиус  $OR$  предотвращает подрезание проволоки в месте второй сварки.

4. Для того чтобы торец капилляра не касался соседних соединений и перемычек в случае малого размера контактных площадок и малого расстояния между ними, используют капилляр с утонченным наконечником (рис. 4). При его подборе необходимо учитывать диаметр торца  $T$ , точнее  $T/2$ , определяемый расстоянием  $BPP$

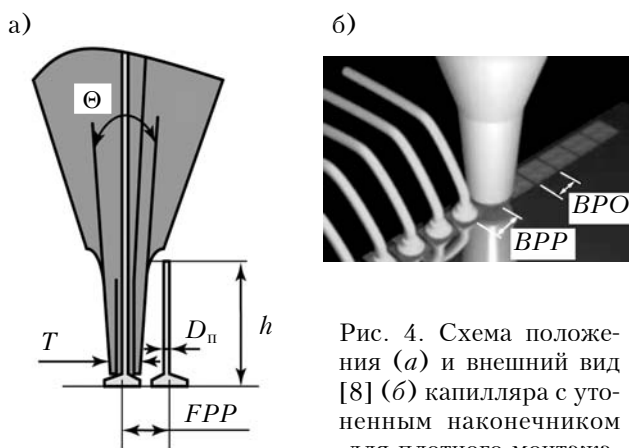


Рис. 4. Схема положения (а) и внешний вид [8] (б) капилляра с утонченным наконечником для плотного монтажа

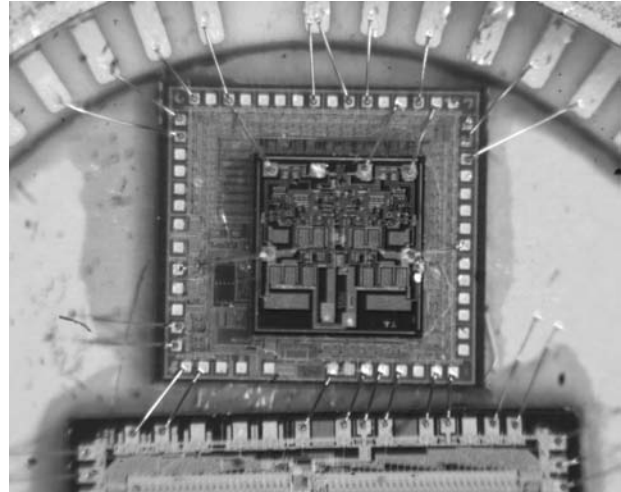


Рис. 5. Многокристаллический модуль в металлокерамическом корпусе с проволочными межсоединениями типа «шарик — клин»

между центрами контактных площадок на кристалле (рис. 4, б; здесь  $BPO$  — размер вскрытой контактной площадки от пассивации).

Из рис. 4, а видно, что при определенной высоте перемычки возможно ее касание с торцом капилляра, представляющего собой конус. Минимальное расстояние  $FPP$  между центрами сварных точек определяется углом конуса  $\Theta$  и высотой перемычки  $h$  и может быть вычислено по формуле

$$FPP = \frac{h}{\tan \Theta} + WD/2 \quad (6)$$

Термозвуковая микросварка шариком при повышенной частоте ультразвука 104 кГц была применена при монтаже золотых проволочных перемычек диаметром 25 мкм в многокристаллическом модуле (рис. 5). Модуль собран в металлокерамическом 40-выводном корпусе, в котором установлены три кристалла ИС, включая конструкцию «кристалл на кристалле». На нижнем кристалле этой конструкции имеются контактные площадки с выращенными золотыми контактными выступами (бампами) для обеспечения межкристаллического соединения проволочными выводами без повреждения контактных площадок в месте второй сварки методом «шарик — клин». Микросварка выполнялась при температуре рабочей зоны 145°С. Следует отметить, что выращивание контактных площадок в виде выступов необходимой толщины является сложным и дорогостоящим процессом. Альтернативным методом создания бампов на контактных площадках кристалла может быть технология присоединения к ним оплавленных шариков на конце золотой проволоки с отделением проволоки у места перехода проволоки в шар. Подобные конструкции позволяют собрать сложную измерительную систему, включая сенсоры, в одном корпусе или на подложке с минимизацией площади монтажа.

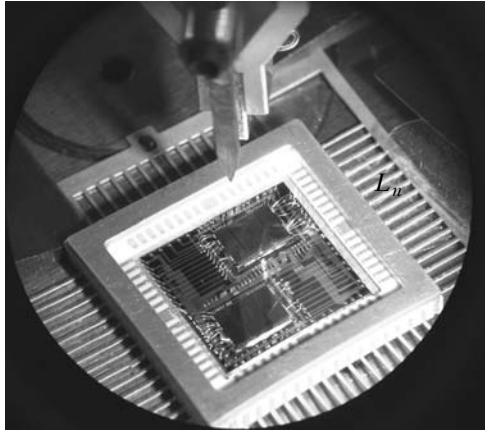


Рис. 6. Многокристаллический модуль в корпусе CQFP с проволочными межсоединениями типа «клин — клин»

При сборке таких приборов существенным преимуществом обладает метод термозвуковой сварки «шарик — клин», позволяющий формировать короткие межкристаллические связи без сложных перемещений капилляра, которые необходимы при микросварке методом «клин — клин» (рис. 6). С другой стороны, при сборке методом «клин — клин» проще обеспечить прямолинейность длинных межсоединений.

#### Заклучение

Пути решения проблем, возникающих при термозвуковой микросварке соединений повышенной плотности, можно обозначить как следующие:

- при малом шаге расположения контактных площадок необходимо использовать проволоку малого сечения (25 мкм) в конструкциях приборов с многоуровневым расположением выводов и шахматным расположением контактных площадок на кристалле, когда максимальная длина формируемых перемычек составляет не более 4–5 мм;
- использование микроинструмента с утонченным рабочим торцом и оптимальными геометрическими параметрами для конкретного диаметра проволоки;

- применение прецизионных устройств формирования шарика, преимущественно отрицательной полярности, обеспечивающих воспроизводимый диаметр образуемых шариков;
- применение ультразвукового генератора с точной регулировкой подводимой энергии и поддержанием ультразвуковой системы на резонансной частоте для обеспечения минимального разброса деформации шарика на контактных площадках кристаллов ИС.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Integrated interconnect technologies for 3D nano electronics systems / Ed. by M.S. Bakir, J.D. Meindl. — London: Artech House, 2009.
2. Zhong Z., Goh K.S. Analysis and experiments of ball deformation for ultra fine pitch wire bonding // Journal of Electronics Manufacturing. — 2001. — Vol. 10, N 4. — P. 365–371.
3. Harmann G.G. Wire bonding in microelectronics. — USA, NY: McGraw Hill, 3-d edition, 2010.
4. 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. — С. 48–50.
5. Lanin V.L., Petukhov I.B. The spark process of ball formation upon thermosonic welding in electronics // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. — 2013. — Vol. 49, N 2. — P. 148–151. DOI:10.3103/S1068375513020087.
6. Bhothe K.R., Bhothe A.K. World class quality. Using design of experiments to make it happen. — USA, NY: Amacom, 2000.
7. <http://www.smallprecisiontools.com/products-and-solutions/chip-bonding-tools/bonding-capillaries/technical-guide/process-optimization/typical-wire-bond-process-optimization/?oid=569&lang=en>
8. <http://www.smallprecisiontools.com/products-and-solutions/chip-bonding-tools/bonding-capillaries/technical-guide/basic-capillary-design-rules/?oid=560&lang=en>
9. <http://www.smallprecisiontools.com/publications-and-catalogues/chip-bonding-tools-catalogues-and-brochures/chip-bonding-tools-catalogues-pdf-catalogues/?oid=452&lang=en>

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 21.11 2013 г.*

*В. Л. ЛАНИН, И. Б. ПЕТУХОВ*

Білорусь, м. Мінськ, БГУІР, УП «КБТЕМ-СО» ДНВО «Планар»  
E-mail: vlanin@bsuir.by, petuchov@kbtcm.by

## ОТРИМАННЯ З'ЄДНАНЬ ПІДВИЩЕНОЇ ЩІЛЬНОСТІ ТЕРМОЗВУКОВИМ МІКРОЗВАРЮВАННЯМ У 3D ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМАХ

*Розглянуто процеси отримання микросварних з'єднань підвищеної щільності в 3D інтегральних схемах термозвуковим микросварюванням, що включають використання підвищених частот ультразвуку, застосування мікроінструментів з тоншенням робочого торця і прецизійних пристроїв формування кульки, що забезпечують відтворюваність якості з'єднань.*

*Ключові слова: микросварювання, термозвук, з'єднання, інтегральні мікросхеми.*

OBTAINING RAISED DENSITY CONNECTIONS BY THERMOSONIC  
MICROWELDING IN 3D INTEGRATED MICROCIRCUITS

The authors consider the processes of obtaining raised density microwelded connections in 3D-integrated microcircuits by the thermosonic microwelding. The processes include the use of the raised frequencies of ultrasound, application of the microinstrument with a thinning of the working end and precision devices for ball formation, which provide reproducibility of connections quality.

At a small step of contact pads, the use of a wire of small diameter (not more than 25  $\mu\text{m}$ ) is necessary for devices with a multilevel arrangement of leads and chess arrangement of contact pads on the chip, providing the maximum length of the formed crosspieces does not exceed 4–5 mm.

**Keywords:** microwelding, thermosonic, connections, integrated microcircuits.

## REFERENCES

1. *Integrated Interconnect Technologies for 3D Nano Electronics Systems*. Ed. by M.S. Bakir, J.D. Meindl, London, Artech House, 2009, 528 p.
2. 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, pp. 365–371.
3. Harmann G.G. *Wire Bonding in Microelectronics*, USA, NY: McGraw Hill, 3-d edition, 2010, 432 p.
4. Lanin V., Petuhov I., Mordvintsev D. [Improvement of microwelded connections quality in integrated circuits by use raised frequency ultrasonic systems] *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 2010, no 1, pp. 48–50 (in Russian)
5. Lanin V.L., Petukhov I.B. The spark process of ball formation upon thermosonic welding in electronics. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2013, vol. 49, no 2, pp. 148–151. DOI:10.3103/S1068375513020087.
6. Bhote K.R., Bhote A.K. *World class quality. Using design of experiments to make it happen*. USA, NY, Amacom, 2000, 487 p.
7. <http://www.smallprecisiontools.com/products-and-solutions/chip-bonding-tools/bonding-capillaries/technical-guide/process-optimization/typical-wire-bond-process-optimization/?oid=569&lang=en>
8. <http://www.smallprecisiontools.com/products-and-solutions/chip-bonding-tools/bonding-capillaries/technical-guide/basic-capillary-design-rules/?oid=560&lang=en>
9. <http://www.smallprecisiontools.com/publications-and-catalogues/chip-bonding-tools-catalogues-and-brochures/chip-bonding-tools-catalogues-pdf-catalogues/?oid=452&lang=en>

## НОВЫЕ КНИГИ

## НОВЫЕ КНИГИ

Сукачев Э. А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами.—  
Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2013.

Приведены принципы построения и функционирования сетей связи с подвижными объектами при использовании сотовой структуры зоны покрытия; основы организации многостанционного доступа с различными видами разделения сигналов; технические характеристики цифровых стандартов систем подвижной радиосвязи, получивших широкое признание в мировой практике. Исследуются различные модели распространения радиоволн вблизи поверхности земли, которые используются для расчетов уровня сигнала на входе приемников базовых и мобильных станций. Большое внимание уделяется вопросам анализа внутрисистемных помех и методам их уменьшения. Приводятся расчетные формулы для определения отношения сигнал/помеха в любой точке соты, а также для контроля степени изменения этого отношения при перемещении мобильной станции в пределах соты. Впервые в систематизированном виде изложены основы геометрии сотовых структур. С позиции теории массового обслуживания рассмотрены элементы проектирования сотовых сетей подвижной радиосвязи. Теоретический материал иллюстрируется большим количеством числовых примеров. Учебное пособие предназначено для студентов старших курсов, аспирантов и специалистов в области проектирования, разворачивания и тестирования сотовых сетей радиосвязи с подвижными объектами.

