

Формирование объемных выводов для Flip-Chip монтажа кристаллов термозвуковой микросваркой

Активное развитие электроники и производственных технологий способствует разработке и созданию более совершенных микроэлектронных устройств с широким диапазоном функциональных возможностей при минимизации массо-габаритных показателей и затрат на изготовление. Выбор цифровой электроники в качестве приоритетного направления развития электронной индустрии требует обеспечения особой надежности высокочастотных микроэлектронных устройств гигагерцового диапазона.

Владимир Ланин,
профессор

vlanin@bsuir.by

Александр Шепелевич

shepelevich.Alex@gmail.ru

Классификация Flip-Chip технологий

Анализ состояния этой проблемы позволяет выделить несколько направлений и потенциальных возможностей ее решения. Огромное значение имеет этап сборки (корпусирование) и создания электрических соединений в микроэлектронных устройствах. Во-первых, соединения кристаллов интегральных схем с подложкой или выводной рамкой корпуса должны иметь хорошие электрические характеристики и минимальную длину, поскольку это одни из ключевых факторов повышения скорости обработки цифровой информации и минимизации размеров элементной базы. Во-вторых, технологический процесс должен быть относительно простым при минимальных затратах на создание соединений.

До сих пор в микроэлектронике самым распространенным процессом формирования электрических соединений нулевого и первого уровней является ультразвуковая (УЗ) микросварка проволокой [1]. Однако в силу условий, обозначенных выше, постепенно повышается роль технологии монтажа кристалла интегральной микросхемы планарной стороной вниз, к подложке. Эта технология, известная как Flip-Chip, насчитывает несколько разновидностей. Присоединение Flip-Chip кристаллов на основе термозвуковым методом — одна из них [2].

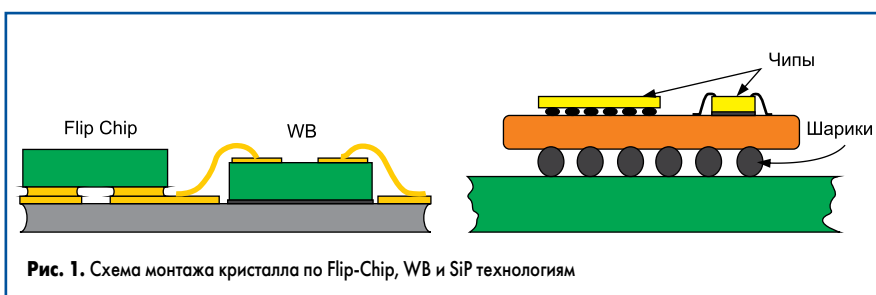
Доля прогрессивных технологий сборки интегральных микросхем, в том числе Flip-Chip, по срав-

нению с технологиями сварки проволокой только за четыре года (с 2006 по 2010 г.) возросла на 5% (с 10 до 15%) [3]. Рост удельного веса в технологии сборки интегральных микросхем вызван исключительными особенностями Flip-Chip технологии.

Основное преимущество этой технологии — высокая плотность монтажа и очень короткие электрические связи, поскольку вывод располагается непосредственно напротив контактных площадок кристалла и основания. Высокая плотность монтажа подразумевает малую площадь, занимаемую электронным компонентом, и предельно малый шаг выводов (менее 150 мкм). Это особенно актуально в сфере портативной электроники (смартфоны, планшеты, ноутбуки): габаритные размеры таких устройств напрямую зависят от применяемой компонентной базы.

Сравнение Flip-Chip с технологией проволочного монтажа (WB) показывает, что можно экономить до 30% площади [4] (рис. 1). Эта перспектива особенно ценна для технологий COB, многокристалльных модулей и микросборок 3D-интеграции, актуальных в настоящее время. По словам Дж. Рилея, признанного эксперта в технологии Flip-Chip, «ликвидация проволочных соединений снижает емкостные и индуктивные потери в 10 раз, уменьшая длину связей в 25–100 раз, в результате увеличивается скорость прохождения сигнала вне кристалла».

По сути, кристалл является одновременно корпусом микросхемы, и при этом достигаются отличные электрические характеристики, что очень важно для высокочастотных устройств. По сравнению с соединениями проволокой пониженная индуктивность столбиков приводит к снижению потерь и уменьшению энергопотребления [5]. Помимо этого обеспечиваются хорошие условия теплообмена, ведь в случае применения Flip-Chip идет конвективный теплообмен с внутренним пространством корпуса всего электронного устройства, а в обычных корпусированных микросхемах первая фаза теплообмена — теплообмен кристалла внутри корпуса, то есть



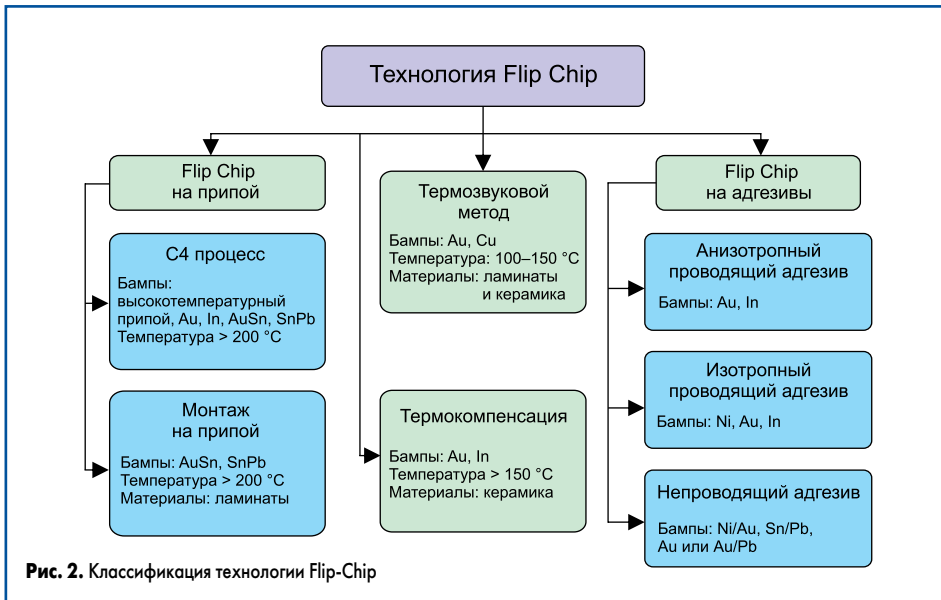


Рис. 2. Классификация технологии Flip-Chip

температура кристалла во втором случае на 20...30 °C выше [6].

Последние достижения Flip-Chip технологии при трехмерном (пространственном) расположении чипов (микросхемы 3D-интеграции) позволяют достичь беспрецедентной степени миниатюризации и надежности [7].

В настоящее время разработано несколько способов монтажа по методу Flip-Chip. Для того чтобы выбрать оптимальный метод Flip-Chip в условиях производства, необходимо четко понимать особенности каждого из них с учетом требований, предъявляемых к кристаллу и конструкции в целом. Общая классификация технологии Flip-Chip представлена на рис. 2.

Как и любая производственная технология, Flip-Chip не лишена недостатков. Наиболее важно учитывать следующие:

- Сложность выходного контроля.
- Необходимость наличия прецизионного сборочного оборудования.
- Низкая ремонтпригодность.
- Для неразрушающего контроля необходимо рентгеновское оборудование.

Анализ характеристик технологии показывает, что Flip-Chip на золотых «бампах» будет отличной альтернативой монтажу на шариках припоя, так как припой можно использовать не для любых кристаллов. В последнее время широкое распространение получили кристаллы GaAs и InP, на которых контактные площадки выполнены из золота [8]. Золото и припой плохо совместимы, поскольку наблюдается процесс «растворения» золотых контактных площадок, что пагубно влияет на электрические соединения. Высокая проводимость золота является, пожалуй, наиболее весомым преимуществом по сравнению с припоем. Сравнение свойств двух материалов показывает, что свинец (и его сплавы) имеет электрическое сопротивление 22 мкОм·см, тогда как у золота оно 2,1922 мкОм·см, то есть на порядок ниже.

Малая длина электрических соединений, а также малая индуктивность золотых «бампов» по сравнению с проволочным соединением (0,7 против 1,1 нГн/см при длине 140 мкм

и 1–2 мм соответственно) — весомое преимущество Flip-Chip технологии при сборке высокочастотных микросистемных устройств. Низкое сопротивление золотых «бампов» и малая индуктивность делают эту технологию оптимальной для создания высокочастотных устройств гигагерцового диапазона.

В настоящее время технология Flip-Chip на золотых столбиках основывается на двух ключевых принципах: это микросварка металлов (взаимная диффузия металлов контактной площадки и столбика) и создание электрических контактов за счет использования проводящих и непроводящих адгезивных материалов.

В случаях, когда используются адгезивные материалы, такие как анизотропные проводящие пленки/пасты (ACF/ACP), непроводящие пасты (NCP) или клеи, металлическая связь между контактной площадкой подложки и столбиком, сформированным на кристалле, не образуется, поэтому для фиксации кри-

сталла и обеспечения электрического контакта необходимо применять смолы, отвердевающие при высокой температуре. Как правило, в таком случае для отверждения эпоксидной смолы требуется около 20 с [9]. Это сильно увеличивает время монтажа и снижает производительность. Кроме того, при использовании проводящих клеев размеры взвешенных в составе адгезива частиц должны быть значительно меньше выводов (доли микрон): это необходимо для обеспечения надежного электрического контакта при нарушении плоскостности контакта и контактной площадки платы.

Flip-Chip технология избавлена от этих недостатков благодаря щадящему температурному режиму и низкому значению механического усилия, прикладываемого к кристаллу. Это исключает растрескивание кристалла и выход его из строя из-за высокой температуры.

Методика формирования объемных выводов для Flip-Chip

В качестве образцов изделий использовались интегральные структуры, представленные на рис. 3. В функциональном плане эти кристаллы для отработки технологии монтажа подходят оптимальным образом ввиду своих габаритных показателей, материалов кристалла и размеров контактных площадок. На кристалле транзистора размером 3×3 мм (рис. 3а) расположены контактные площадки 200×200 мкм, выполненные из алюминия толщиной 15 мкм. На этих площадках сформировано четыре «бампа» (рис. 3в).

Для формирования объемных выводов термозвуковым методом использована золотая проволока Heraeus средней твердости (диаметр — 25 мкм). Капилляр для термозвуковой сварки — типа SBN-35130-585E-ZP36T.

Для создания «бампов» применена универсальная установка УЗ-микросварки ЭМ-4320У со сварочной головкой (рис. 4) для сварки типа

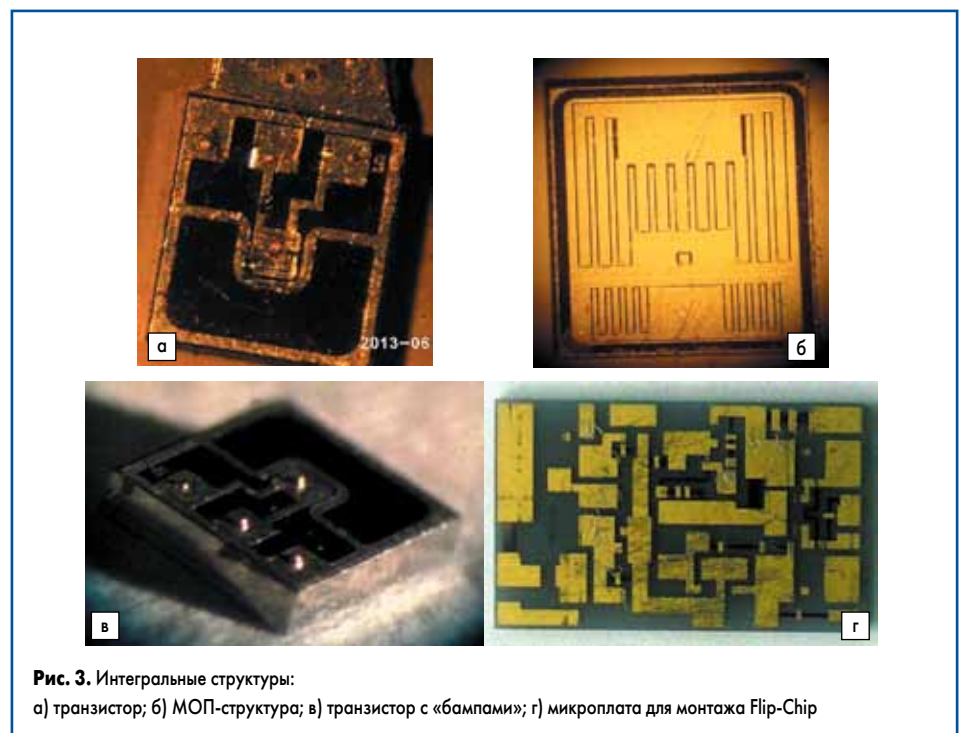
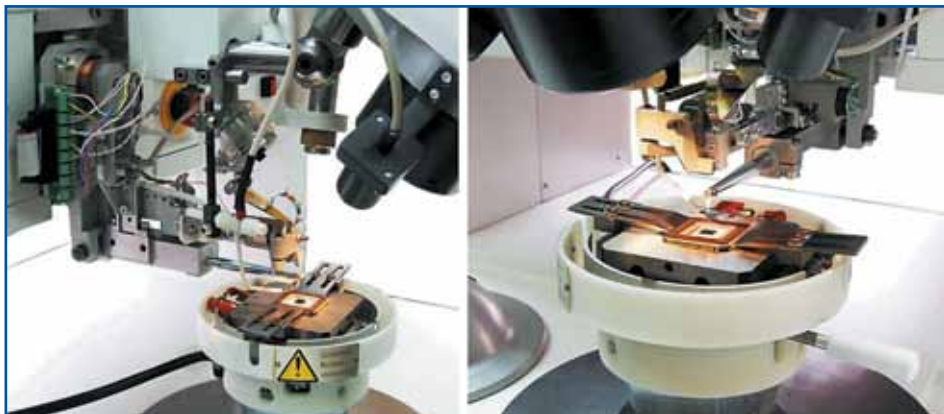


Рис. 3. Интегральные структуры:

а) транзистор; б) МОП-структура; в) транзистор с «бампами»; г) микроплата для монтажа Flip-Chip


Рис. 4. Сварочная головка установки ЭМ-4320У

«шарик-клин» в комплекте с БФШ и УЗГ повышенной частоты (110 кГц) [10].

Для отработки технологии Flip-Chip спроектирован стенд, состоящий из УЗ-генератора УЗГ-01 мощностью 40 Вт и преобразователя с установки ЭМ-4320-3, а также микроскопа ОГМЭ-3 на штативе и сварочной головки вертикального перемещения (рис. 5). В качестве рабочего инструмента использовался капилляр из карбида вольфрама ВК6 с пирамидальной канавкой на торце.

Сварочная головка, в которой закреплен УЗ-преобразователь, может свободно перемещаться в вертикальном направлении на подшипниках по направляющим каретки. На станине стенда расположен предметный столик от установки ЭМ-4320 с термопарой и возможностью нагрева. Нагревательный столик подключен к блоку питания Б5-78. Температура нагрева стола предварительно откалибрована в значениях тока по заданному термопрофилю.

Подложка, на которой выполняется монтаж Flip-Chip, закрепляется на столике механическими зажимами. Кристалл захватывается вакуумом, подводимым через сквозное отверстие в инструменте. Касание кристалла определяется с помощью датчика в УЗГ-01. При этом создается постоянное нагружение, которое регулируется «плавающим» по градуированной рейке грузом. Механизм сварочной головки работает по принципу разгрузки за счет изменения плеча рычага. Минимальное нагружение, которое можно создать на этом стенде, — 50 г. Такое нагружение ограничено конструкцией опор, так как при меньшем значении головка не способна преодолеть силу трения в опоре, в результате чего возникает торможение. При использовании подшипников качества минимальное нагружение можно снизить до 20 г.

Для контроля усилия на сдвиг, которое является косвенным показателем прочности сварки, использован электронный грамометр в специально разработанной оснастке.

Исследование технологии формирования объемных выводов

С помощью регрессионного анализа исследован термозвуковой метод формирования объемных выводов из золотой проволо-

ки («бампов»). От технических параметров «бампов», сформированных на контактных площадках кристаллов, зависит качество присоединения кристалла к подложке, что дает возможность классифицировать в дальнейшем дефекты и отказы на разных уровнях соединений.

Статистические данные для модели получены путем анализа результатов по плану полного факторного эксперимента 2^6 . Несмотря на наличие четырех ключевых параметров (мощность и время УЗ-импульса, нагружение и температура нагрева подложки), в статистическую обработку включены и такие параметры, как ток высоковольтного разряда и время импульса EFO, которые в достаточной степени влияют на прочность присоединения «бампов» [11]. Параметры EFO определяют диаметр шарика и симметрию относительно оси проволоки. При этом парные взаимодействия параметров не учитываются ввиду отсутствия априорных данных об их корреляционной связи. В качестве критерия прочности присоединения «бампа» выступает усилие на сдвиг G .

Уровни варьирования для кодирования в матрице ПФЭ приведены в таблице.

Таблица. Кодирование факторов ПФЭ

Фактор	Оптимальное значение	Уровни варьирования	
		+1	-1
Температура T , °C	150	180	120
Длительность EFO (t_{EFO}), мс	3	4	2
Ток EFO (I_{EFO}), mA	25	30	20
Мощность УЗ-импульса (P_{US}), Вт	0,7	1,0	0,3
Нагружение (F), г	50	80	30
Длительность УЗ-импульса (t_{US}), мс	60	80	40

Матрица планирования эксперимента имеет 64 строки. Каждой вариации параметров соответствует четырехкратное повторение эксперимента. В результате статистической обработки данных эксперимента построена модель, описывающая условия достижения максимального усилия на сдвиг:

$$G = 1,68 + 0,013T - 0,018t_{EFO} - 0,011I_{EFO} + 2,03P_{US} + 0,017t_{US} + 1,025F, \quad (1)$$

где T — температура нагрева подложки, °C; t_{EFO} — длительность импульса оплавлен-


Рис. 5. Стенд термозвуковой сварки Flip-Chip:

- 1 — микроскоп ОГМЭ-3;
- 2 — рычаг нагружения;
- 3 — нагревательный столик;
- 4 — блок питания Б5-78;
- 5 — УЗ-преобразователь;
- 6 — УЗ-генератор УЗГ-01;
- 7 — каретка сварочной головки

ния EFO, мс; I_{EFO} — ток импульса EFO, мА; P_{US} — мощность УЗ-импульса, Вт; t_{US} — длительность УЗ-импульса, мс; F — нагружение, г.

Для оценки адекватности модели использовали t -критерий Стьюдента и F -критерий Фишера. Критическое значение F -критерия, равное 1,55, меньше 19,75 по модели, а критическое значение t -критерия 2 при доверительной вероятности $\alpha = 0,05$ подтверждает значимость коэффициентов модели (1). Согласно модели, наиболее влияющими параметрами процесса являются мощность УЗ-импульса P_{US} и нагружение F .

Для подтверждения этого дополнительно исследовали влияние мощности УЗ-импульса при фиксированных прочих параметрах. На рис. 6 отображено распределение зон контактного взаимодействия золотого «бампа» и алюминиевой контактной площадки при различной мощности ультразвукового импульса и фиксированных параметрах: нагружение — 50 г, длительность УЗ-импульса — 60 мс, температура подогрева подложки — +150 °C.

Установлена следующая тенденция: с увеличением мощности УЗ-воздействия зона контактного взаимодействия «бампа» с контактной поверхностью площадки стремится к максимуму, причем взаимодействие начинается с тонкого кольца схватывания по периферии «бампа» и увеличивается вглубь при увеличении мощности (рис. 7). В результате исследований установлена высокая степень влияния нагружения, мощности УЗ-импульса и температуры на качество сварки. В целом результаты согласуются с теорией микроскольжения Миндлина. Изменение зоны контактного взаимодействия позволяет рассчитать периферическое кольцо взаимодействия, рост которого вызван изменением соотношения нормальной P_n и тангенциальной P_t сил. Оценка размера зоны контактного взаимодействия позволяет косвенно оценить прочность присоединения «бампа» к контактной площадке. Очевидно, что чем больше площадь интердиффузии, тем выше прочность соединения.

Внешний вид золотого объемного вывода («бампа») показан на рис. 8.

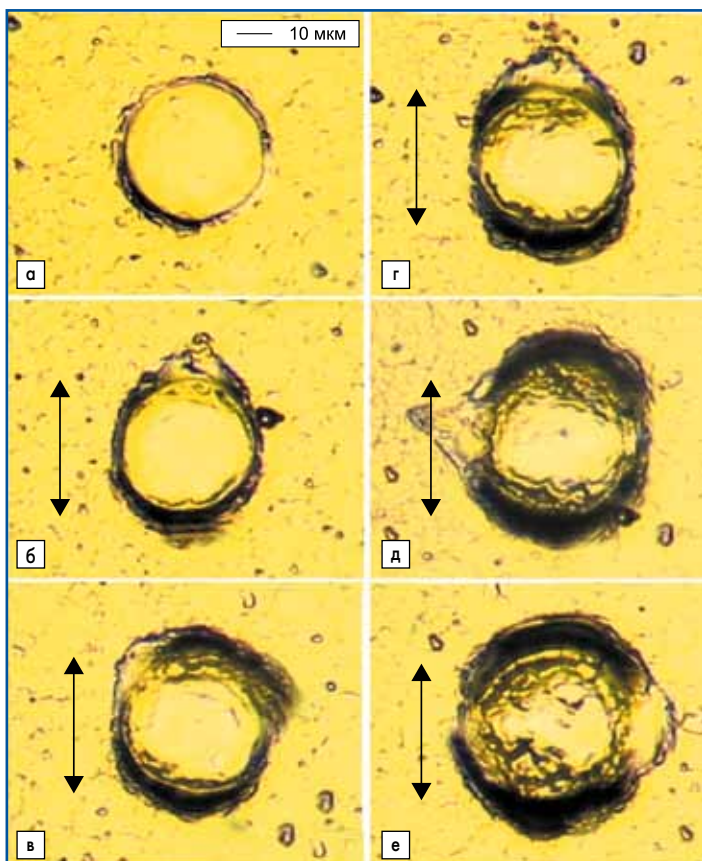


Рис. 6. «Отпечатки» — следы взаимодействия «бампов» с материалом контактной площадки при различной мощности УЗ-импульса: а) без УЗ; б) 0,3 Вт; в) 0,7 Вт; г) 1 Вт; д) 1,4 Вт; е) 2 Вт. (Направление УЗ-колебаний показано стрелками)

В настоящее время на предприятии ведется окончательная наладка установки монтажа термозвуковой сваркой Flip-Chip ЭМ-4330 с учетом изученных закономерностей и отработки технологии.

Выводы

Расширение области применения технологии Flip-Chip обусловлено возможностью достичь высокой плотности монтажа, значительно уменьшить массо-габаритные характеристики изделий портативной электроники и одновременно повысить скорость обработки цифровой информации за счет очень коротких электрических связей между кристаллом и основанием. Технология Flip-Chip монтажа на золотых объемных выводах термозвуковой микросваркой отличается, с одной стороны, высокой производительностью, а с другой — невысоким температурным и механическим воздействием на кристалл. Наиболее влияющими параметрами на прочность присоединения объемных выводов из золотой проволоки к кристаллу являются мощность УЗ-импульса и статическая нагрузка на инструмент, под воздействием которых формируется зона взаимной диффузии.

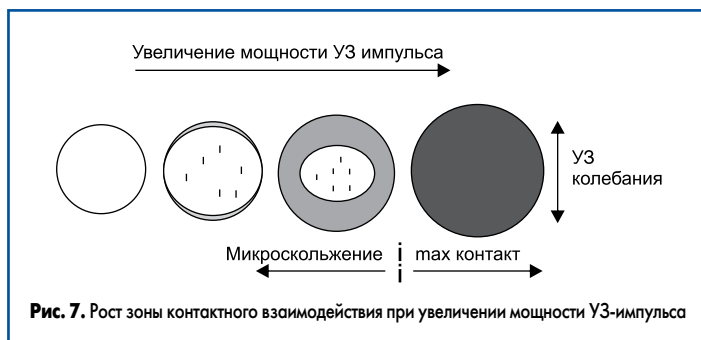


Рис. 7. Рост зоны контактного взаимодействия при увеличении мощности УЗ-импульса



Рис. 8. «Бамп» на контактной площадке

Литература

- Harmann, G. Wire bonding in microelectronics. N. Y.: McGraw Hill, 2010.
- Riley G. A. Introduction to Flip Chip: what, why, how — www.flipchips.com
- Vardman J.E. Advanced Packaging Interconnect Trends and Technology Developments. K&S Interconnect technology symposium. 2010.
- Flip-Chip Packaging Technology Solutions — <http://www.amkor.com/go/Flip-Chip-Packaging>.
- Comparing Flip-Chip and Wire-Bond Interconnection Technologies — www.processsolutionsconsulting.com
- Tschan T. Deciding between Flip-Chip and Wire Bonding — www.oerlikon.com
- Lau J. Low cost Flip-Chip Technologies for DCA, WLPSP and PBGA Assemblies. N. Y.: McGraw Hill, 2000.
- Kusamitsu H., Maruhashi K., Morishita Y., et al. Study of Flip-Chip bump interconnection in mm-wave GaAs // MMIC, NEC Research and Development. 1998. Vol. 39. No 3.
- Jordan J. Gold stud bump in Flip-Chip application. IEEE International Electronics Manufacturing Technology Symposium. San Jose, CA. July 2002.
- Ланин В. Л., Петухов И. Б., Шевцов В. В. Ультразвуковое оборудование для сварки микропроводников // Компоненты и технологии. 2009. № 8.
- Ланин В. Л., Шепелевич А. В. Технологические особенности Flip-Chip монтажа термозвуковой микросваркой // Технологии в электронной промышленности. 2013. № 5.