

# Выбор оборудования для Flip-Chip монтажа кристаллов термозвуковой микросваркой

**Рынок портативной электроники развивается быстрыми темпами. Это усиливает спрос на более эффективные, легкие электронные компоненты малых размеров с низкой стоимостью. Эта тенденция продолжится в обозримом будущем, поскольку перед каждым новым поколением мобильных телефонов, ноутбуков, смарт-карт будет стоять задача достичь высокой производительности при оптимальном соотношении стоимости изготовления и массо-габаритных показателей. Технология Flip-Chip монтажа позволяет получить оптимальные решения для многих приложений при сохранении высокого качества и высокой производительности при низкой стоимости. В последние годы технология Flip-Chip монтажа термозвуковой микросваркой на золотые столбики находится в фазе быстрого развития. Этому способствует наличие прецизионного сборочного оборудования. При разработке оборудования данного типа аккумулируются передовые инженерные решения.**

**Владимир Ланин,**  
профессор

vlanin@bsuir.by

**Александр Шепелевич**

shepelevich.Alex@gmail.ru

## Развитие Flip-Chip технологии

Современная технология корпусирования микроэлектронных устройств претерпевает значительные изменения, что обусловлено различными техническими и экономическими факторами. Помимо традиционной роли обеспечения механической защиты, на корпус современного микроминиатюрного устройства возложены функции управления температурным и электрическим режимами. Исследование вопроса выбора технологии корпусирования и создания электрических соединений показывает постепенное увеличение удельного веса различных модификаций Flip-Chip относительно проволочного монтажа алюминиевой или золотой проволокой [1, 2].

Микросварка проволокой имеет большое значение для микроэлектронной технологии и по-прежнему широко применяется при формировании электрических соединений большинства корпусных компонентов.

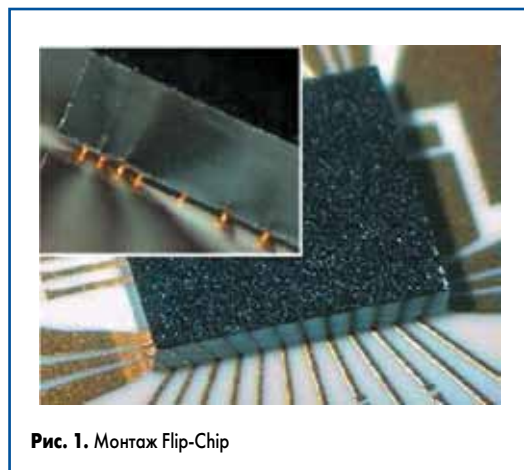


Рис. 1. Монтаж Flip-Chip

Однако наличие относительно длинных контактных соединений, расположенных преимущественно по периферии кристалла интегральной схемы, не позволяет рационально использовать пространство кристалла и требует наличия корпуса в качестве механической защиты. Кристаллы, посаженные по методу Flip-Chip, лишены этого недостатка: матрица столбиковых выводов расположена на лицевой стороне кристалла и обеспечивает создание надежного электрического и механического соединения с подложкой или печатной платой в процессе монтажа при различных сочетаниях технологических параметров, зависящих от разновидностей техпроцесса. При этом максимально эффективно используется площадь кристалла, а сам кристалл, по сути, является корпусом (рис. 1), который в некоторых случаях заливается эпоксидными составами для защиты от влаги и механических повреждений. Ввиду малой площади, занимаемой установленным кристаллом, можно достичь высокой плотности монтажа, то есть Flip-Chip отлично подходит для создания многокристалльных модулей на керамическом основании, а также для монтажа на печатные платы.

Монтаж кристаллов методом Flip-Chip — далеко не новая технология. Один из вариантов этой технологии — монтаж кристалла посредством шариков припоя — разработан и внедрен еще в 60-х годах прошлого века фирмой IBM при производстве ЭВМ [3, 4]. В то время технология была затратной. Как только производство кристаллов интегральных микросхем стало дешевле за счет использования новых материалов и оборудования, область применения монтажа по технологии Flip-Chip расширилась. Активное развитие науки и техники привело к созданию разновидностей Flip-Chip монтажа, которые имеют достоинства и недостатки. В частности, к достоинствам можно отнести следующие:

- Малые размеры: величина посадочного места на печатной плате всего на 5% больше реального размера кристалла, что актуально при тенденции увеличения плотности монтажа схемных компонентов и числа выводов на кристалле; малые вес и высота кристалла.
- Повышенная функциональность: применение Flip-Chip монтажа позволяет увеличить количество входов/выходов, в то время как в технологии микросварки проволокой оно ограничено небольшой зоной по периметру кристалла интегральной микросхемы.

**Таблица. Параметры электрических соединений для различных технологий монтажа**

Параметры	Микросварка проволокой	TAB	Flip-Chip
Сопротивление на единицу длины, Ом/см	1	0,25	0,08
Индуктивность на единицу длины, нГн/см	10	8	7
Типичная длина, мм	1,2–2,4	2,5–7,2	0,07–0,15
Типичное сопротивление, мОм	50–100	25–75	<1
Типичная индуктивность, нГн	1,2–2,5	2,1–6,3	<0,1

- Улучшенные рабочие характеристики: короткие электрические соединения за счет малого размера столбиков обеспечивают низкие значения индуктивности, сопротивления и емкости (таблица).
- Высокая надежность: заполнение эпоксидным составом межконтактных пространств больших кристаллов позволяет снизить количество столбиков, приходящихся на одно контактное соединение, с трех до одного.
- Улучшенные тепловые характеристики: обратную сторону кристалла можно использовать для эффективного отвода тепла [5].
- Низкая стоимость.

Как и любая производственная технология, технология Flip-Chip не лишена недостатков. Перечислим наиболее существенные из них: сложность выходного контроля; необходимость прецизионного оборудования; низкая ремонтпригодность; для неразрушающего контроля необходимо рентгеновское оборудование.

Несмотря на недостатки, технология успешно развивается, находя применение при решении специфических задач. В настоящее время технология Flip-Chip основывается на двух ключевых принципах: это микросварка металлов (взаимная диффузия металлов контактной площадки и столбика) и создание электрических контактов за счет адгезивных материалов. В случаях, когда используются адгезивные материалы, такие как анизотропные проводящие пленки/пасты (ACF/ACP), непроводящие пасты (NCP), истинная металлическая связь между контактной площадкой подложки и столбиком, сформированным на кристалле, не образуется, поэтому для фиксации кристалла и обеспечения электрического контакта необходимо применять смолы, отвердевающие при высокой температуре (смолы горячего отверждения). Как правило,

в таком случае для отверждения эпоксидной смолы требуется около 20 с. Несомненно, это сильно увеличивает время монтажа и снижает производительность, что рождает потребность в более эффективных методах.

До недавнего времени самым распространенным видом Flip-Chip монтажа был монтаж кристалла на шарики из припоя. Как правило, использовался припой с содержанием свинца. В связи с этим возникли проблемы, поскольку на территории Европейского Союза 1 июля 2006 года вступила в действие директива RoHS [6], целью которой является ограничение применения опасных веществ для обеспечения защиты здоровья людей и окружающей среды. Согласно этой директиве ограничивается использование потенциально опасных элементов в электротехническом и электронном оборудовании и производстве. В категорию вредных веществ внесен свинец, следовательно, производители электронных компонентов вынуждены использовать бессвинцовые припои.

Если говорить о принципиальных моментах, то бессвинцовая пайка практически ничем, кроме температуры, не отличается от традиционной Sn/Pb-технологии. Однако для Flip-Chip монтажа процесс с использованием бессвинцовых припоев отработан не полностью [6]. При воздействии повышенной температуры может произойти растрескивание кристаллов. Под действием температуры происходит расслоение основания печатной платы, ухудшается плоскостность, что отрицательно сказывается на точности установки кристалла, особенно кристалла больших размеров. Для оценки влияния повышенной температуры и более длительного времени пайки при использовании бессвинцовых припоев при Flip-Chip монтаже требуется переаттестация существующей технологии пайки. Такие исследования сегодня проводятся SEMI и JEDEC.

Выбор припойной композиции — не единственная проблема. Помимо этого, необходимы операции нанесения флюса на выводы и последующей очистки, а в процессе монтажа возможно возникновение различного рода дефектов («холодная пайка», непропаи, растекание шарика припоя, плохая смачиваемость), присущие классической технологии пайки (SMD, выводные компоненты).

В связи с определенными технологическими трудностями использования Flip-Chip на шариках припоя все более значительной становится роль термовзвучного монтажа Flip-Chip на золотые столбики. Тем более что в последнее время получили распространение кристаллы на основе GaAs и InP, на которых контактные площадки выполняются из золота. Золото и припой, так же как алюминий и припой, несовместимы, поскольку наблюдается процесс «растворения» золотых контактных площадок, что пагубно влияет на соединения.

Конечно, необходимо упомянуть о постепенно повышающемся интересе к монтажу Flip-Chip на столбики из меди. Пока этот процесс исследован недостаточно, и к тому же есть определенные технологические трудности. В частности, для формирования столби-

ков Cu электрическим разрядом необходима среда защитных газов. Процесс формирования золотых столбиков избавлен от этой проблемы. Удельная проводимость G золота несколько меньше, чем у меди, однако гораздо выше проводимости припойных сплавов (45,5 против 9 МСм/м max). Малая индуктивность и высокая проводимость делает технологию посадки Flip-Chip на золотые столбики («бампы») весьма привлекательной для создания высокочастотных приборов (вплоть до ГГц-диапазона); относительно низкая температура — одно из ключевых преимуществ Flip-Chip, особенно для интегральных схем, не переносящих высокую температуру (+250 °C и выше).

Техпроцесс монтажа Flip Chip на золотые «бампы» относительно прост и состоит из малого количества операций [7]. В настоящее время с применением этой методики успешно изготавливаются фильтры на ПАВ, MEMS, LED, смарт-карты/RFID-метки. Основа метода — диффузия металлов столбика и контактной площадки, активированной температурой и действием ультразвуковых колебаний (преимущественно на частоте 65 кГц или на удвоенной частоте) при определенной механической нагрузке. При этом максимальные значения температуры находятся на уровне +150...180 °C, что существенно ниже, чем при посадке на шарики припоя и с помощью термокомпрессии (>+200 °C). Относительно невысокая температура процесса также определяется условиями уменьшения роста интерметаллических соединений Au-Al. Исследования показывают, что активный рост интерметаллидов начинается при температуре, превышающей +200 °C [8].

Процесс формирования «бампов» практически полностью повторяет процесс формирования шарика за счет оплавления искрой высоковольтного разряда от устройства формирования шарика (УФШ) золотой проволокой при разварке проволочных переключателей типа «шарик-клин» или «шарик-шарик». Отличие заключается в отрыве проволоки от «бампа» после его присоединения к кристаллу. Высокая надежность процесса микросварки проволокой широко известна, ведь процесс отработывался на протяжении более чем 50 лет, а значит, процессу формирования золотых «бампов» также будут присущи высокие повторяемость и надежность.

После формирования «бампов» кристалл готов к посадке на подложку или плату. Однако негативный момент все же есть: в процессе формирования для «бампов» характерен некоторый разброс по высоте. При посадке большого кристалла разновысотность противоположных сторон может привести к полному отсутствию контакта или же низкой прочности присоединения. Поэтому одним из ключевых требований для качественного присоединения Flip-Chip является высокая степень плоскопараллельности кристалла и подложки, на которую осуществляется монтаж. Для выполнения необходимых условий в техпроцесс формирования золотых столбиков вводят операцию «штамповки бампов»


**Рис. 2.** «Штампованные» столбики

(рис. 2), в результате которой механически деформированные столбики становятся равными по высоте, однако при этом следят, чтобы диаметр шариков не превышал максимально допустимый, поскольку при малом шаге выводов может возникнуть короткое замыкание.

Отлаженный технологический процесс и высокоточное технологическое оборудование позволяют свести к минимуму проблемы короткого замыкания, неодинаковости формы и пр. Особое внимание необходимо уделить выбору оборудования для Flip-Chip монтажа.

### Технологическое оборудование Flip-Chip монтажа на золотые «бампы»

Высокий уровень технологического оборудования, используемого как для формирования золотых микростолбиков («бампов») из проволоки диаметром от 17–25 мкм и выше, так и при посадке Flip-Chip на несущее основание (керамическая подложка, печатная плата и т. д.), — неотъемлемое условие создания микроэлектронного устройства высокого качества.

Как было отмечено выше, процесс формирования золотого столбика — лишь частный случай микросварки золотой проволокой малого диаметра. Вследствие этого опция «формирование бампов» доступна во многих установках микросварки с возможностью сварки «шарик-шарик» и «шарик-клин». Лидерами в сфере точного электронного машиностроения, производящими установки подобного рода (ручные манипуляторы, полуавтоматы и автоматы), являются такие известные фирмы, как F&K Delvotec, Kulicke&Soffa (установки серии 45xx), Palomar Technologies и West Bond.

На постсоветском пространстве ключевые позиции в этом направлении занимает УП «КБТЭМ-СО» ГНПО «Планар», которое выпускает универсальную установку микросварки ЭМ-4320У, обладающую высокими техническими показателями (рис. 3).

В процессе посадки Flip-Chip с золотыми столбиками, сформированными на планарной стороне кристалла, участвуют более сложные технологические машины. Они также изготавливаются как в вариантах полностью ручных установок, где на оператора возложено большинство функций, так и в автоматическом


**Рис. 3.** Установка ЭМ-4320У

и полуавтоматическом вариантах, где степень участия оператора значительно снижается.

Нужно отметить, что сложность оборудования обусловлена специфическим назначением установок. За время, которое технология монтажа Flip-Chip на золотые столбики используется в микроэлектронной промышленности и активно развивается (а это не более чем 20 лет), в прецизионном машиностроении выработаны базовые методологические подходы для конструирования термовзвучковых установок. Применение этих подходов позволяет создавать установки термовзвучкового присоединения кристаллов с широким спектром возможностей и опций в соответствии с требованиями заказчиков.

Flip-Chip установка — это сложный комплекс механических (приводы, клапаны, механизмы нагружения, перемещения и удержания кристаллов и т. д.) и электрических узлов (драйверы двигателей, датчики положений, блоки

нагрева). Система управления установкой строится на базе IBM PC-совместимого компьютера с платами дискретного ввода/вывода I/O (с несколькими каналами ЦАП и АЦП) и стандартными интерфейсами типа RS-232 и USB. В простых моделях может быть реализовано микропроцессорное управление, ручной механизм нагружения, совмещения и посадки Flip-Chip, а автоматические установки, помимо прочих узлов автоматизации, комплектуются платой видеозахвата (преобразующей аналоговый видеосигнал в цифровое изображение) для создания системы технического зрения и системы совмещения. Компьютер обрабатывает данные от датчиков, а также управляет нагревом, механизмами нагружения и прочими узлами по заданной циклограмме техпроцесса. Все вышесказанное можно свести к схеме, показанной на рис. 4 и отражающей принципиальный состав автоматической Flip-Chip установки (наиболее общий случай).

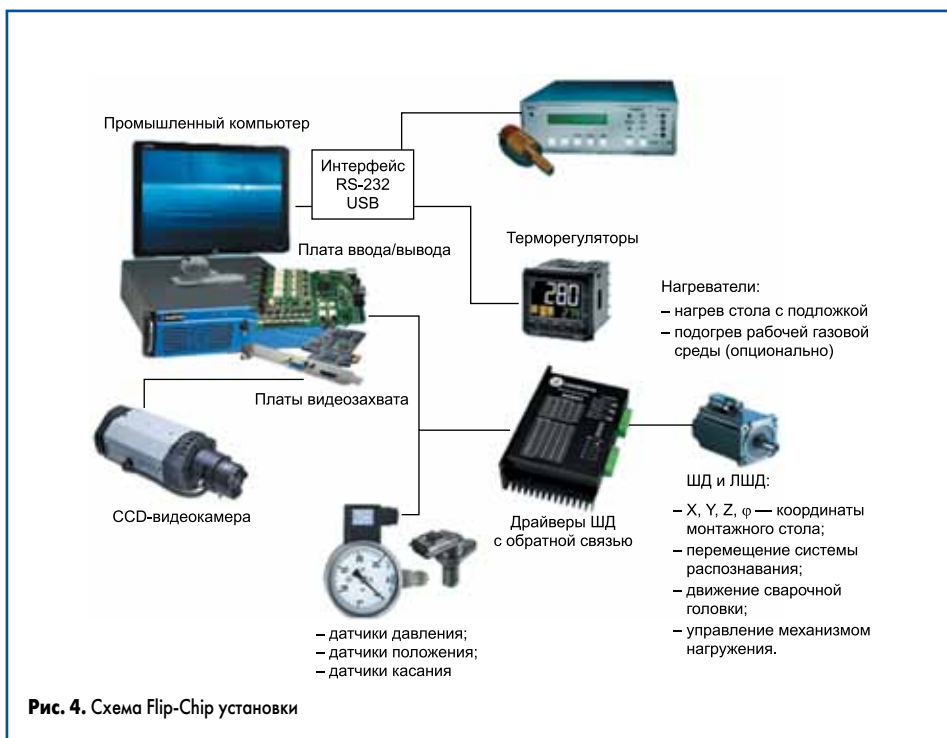

**Рис. 4.** Схема Flip-Chip установки





Рис. 5. Установки Flip-Chip монтажа:  
а) TRESKY T-3002-FC3; б) Fineplacer pico MA; в) ЭМ-4330; г) ASM ADB819-11TS

В качестве хороших образцов Flip-Chip установок следует упомянуть некоторые модели фирм Tresky AG, ASM Pacific Technology, Ltd. и Finetech GmbH & Co. В частности, это Fineplacer pico MA, TRESKY T-3002-FC3 (с ультразвуковым модулем) и ASM ADB819-11TS (рис. 5).

В модельном ряде УП «КБТЭМ-СО» также имеется автоматическая установка монтажа Flip-Chip на золотые столбики термозвуковым методом (ЭМ-4330) (рис. 5в).

Согласно схеме, одним из ключевых узлов Flip-Chip установок является ультразвуковая система, в которую входит ультразвуковой генератор с рабочей частотой 40 или 60 кГц. Рабочий инструмент, закрепленный в преобразователе, на рабочем торце имеет углубление в виде усеченной пирамиды. В пирамиде кристалл с «бампами» удерживается в момент переноса в позицию сварки и во время сварки за счет вакуума, подводимого к нерабочему торцу. Вакуум может создаваться встроенным маломощным вакуумным насосом или может быть взят из вакуумной магистрали предприятия-заказчика. Для управления вакуумом и формирования рабочей газовой среды используют регулируемые клапаны.

К основополагающим относится также система совмещения и распознавания. Именно ей необходимо уделить больше внимания, поскольку в случае некачественного совмещения при посадке кристалла с большим числом выводов на основании с малыми контактными площадками результатом будет отсутствие электрических соединений. Стандартом точности позиционирования Flip-Chip машин является точность 5–10 мкм. Исходя из этих требований, спроектированы несколько систем совмещения и распознавания, в основе которых лежит CCD-камера. Наиболее распространенной системой позиционирования Flip-Chip является DIS (система двойного изображения) (рис. 6).

Система сложна и построена на основе призм, обычных и полупрозрачных зеркал для разделения луча (рис. 7). Изображения лицевой стороны кристалла и подложки преломляются и попадают в объектив камеры, сигнал от камеры обрабатывается платой видеозахвата и отображается на видеомониторе, при этом два изображения отображаются с разной степенью прозрачности, что позволяет совместить «бампы» и контактные площадки подложки.

Резкость и увеличение можно регулировать линзой, управляемой двигателем в режиме микрошага и расположенной между разделителем луча и фокусирующей линзой [9].

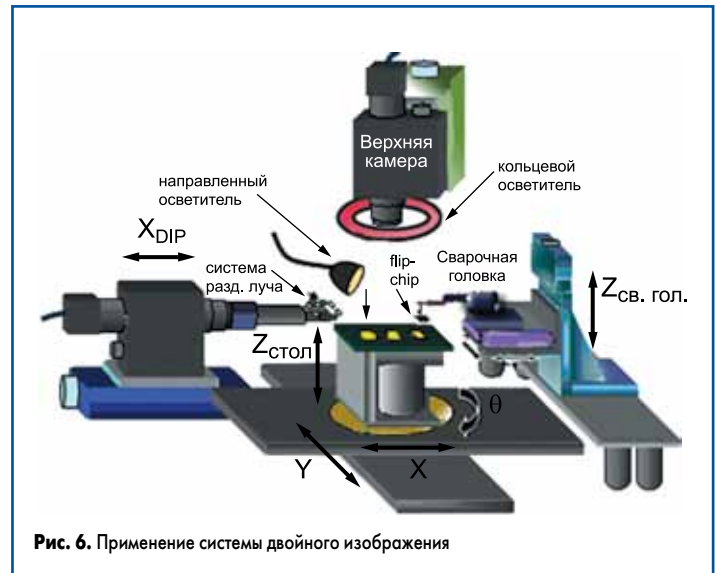


Рис. 6. Применение системы двойного изображения

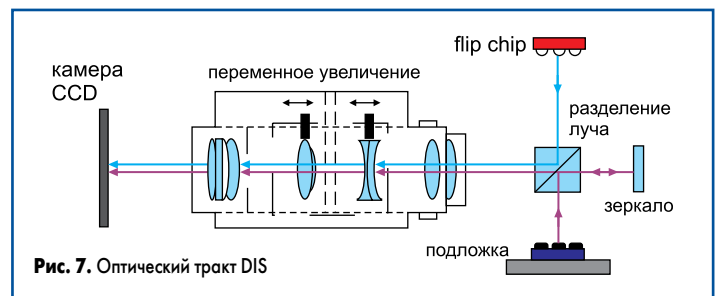


Рис. 7. Оптический тракт DIS

Использование DIS обязывает конструкторов оснащать держатель системы позиционирования как минимум однокоординатным приводом, чтобы убрать DIS с позиции сварки после совмещения. Поиск более простого решения приводит к двухкамерной системе позиционирования. В этом случае одна камера постоянно направлена на подложку. По ней происходит прицеливание и ориентация монтажного столика вместе с подложкой. Вторая CCD-камера направлена на планарную сторону Flip-Chip кристалла. Совмещение изображений происходит программным путем, что накладывает требования на аппаратные ресурсы компьютера. После совмещения рабочий орган с ультразвуковым преобразователем и Flip-Chip поворачивается, включается механизм нагружения и осуществляется подача ультразвукового импульса определенной длительности. Для реализации в «железе» данный метод проще, хоть и должно соблюдаться условие отсутствия люфтов сварочной головки (рабочего органа).

Оптическую систему можно использовать в качестве системы технического зрения (СТЗ) автомата посадки Flip-Chip. В этом случае есть следующий неприятный момент: изображение может «плыть», как показано на рис. 8, что может привести к сбою СТЗ и падению производительности установки [10]. Это вызвано движением нагретого воздуха вблизи рабочего стола и подложки.

Такая проблема замечена еще в процессе термозвуковой сварки золотой проволокой. Одно из возможных решений — разогнать нагретый

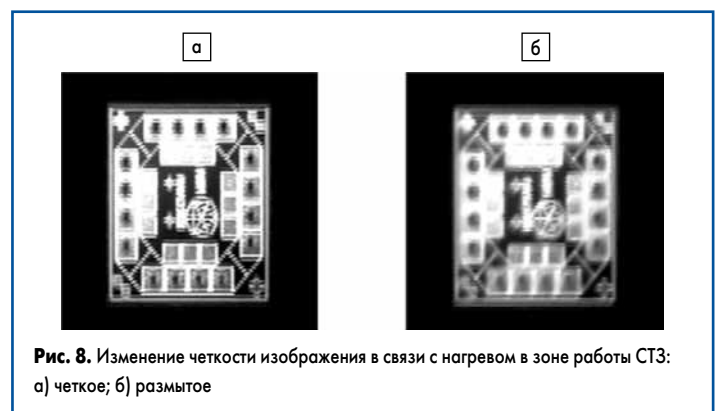


Рис. 8. Изменение четкости изображения в связи с нагревом в зоне работы СТЗ:  
а) четкое; б) размытое

тый воздух из зоны действия машинного зрения потоком очищенного сжатого воздуха комнатной температуры.

Итак, мы показали, сколько различных особенностей необходимо учитывать и какие оригинальные технические решения следует использовать при создании сборочного Flip-Chip оборудования для получения на выходе микроэлектронных изделий высокого качества.

### Заключение

В условиях активного развития микроэлектронных технологий и стремления к миниатюризации Flip-Chip технология на золотых столбиках выглядит отличной альтернативой микросварке проволокой на этапе сборки микроэлектронных устройств. Для достижения высокого качества продукта на выходе при выборе установок монтажа Flip-Chip должны быть учтены следующие особенности:

- Наличие прецизионных приводов перемещения и рабочих механизмов.
- Система совмещения и распознавания должна быть построена по максимально простой схеме.
- Необходимо нивелировать «дрожание» изображения, вызванное нагревом в рабочей зоне.
- На этапе формирования золотых «бампов» следует обеспечить максимально низкий уровень разновысотности и разброс размеров «бампов».

### Литература

1. Comparing Flip-Chip and Wire-Bond Interconnection Technologies — [www.processsolutionsconsulting.com](http://www.processsolutionsconsulting.com)
2. Tschan T. Deciding between Flip Chip and Wire Bonding — [www.oerlikon.com](http://www.oerlikon.com)
3. Harmann G. Wire bonding in microelectronics. N. Y.: McGraw Hill, 2010.
4. Lau J. Low cost Flip Chip Technologies for DCA, WLPSP and PBGA Assemblies. N. Y.: McGraw Hill Professional, 2000.
5. Kurra D. Gold Stud Bumped Flip Chip: Surface Mounting and Joint Integrity with Thermal cycling.
6. Проблемы бессвинцовой пайки. Международный форум «Асолд 2008» // Компоненты и технологии. 2008. № 2.
7. Cheah L. K. Gold to Gold Thermosonic Flip-Chip Bonding // Proceedings HDI. April, 2001.
8. Wulff F. W. Characterization of intermetallic growth of gold ball bonds on aluminium bond pads // International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME). Vol. 3. 2008. No 2.
9. Suss Microtech FC150 Flip Chip Bonder. Lab Manual.
10. Zhang Li. The Influence of Heating Temperature on Alignment Precision in Thermosonic Flip-Chip Bonding // Electronic Packaging Technology & High Density Packaging. ICEPT-HDP 2008. International Conference.