

# Технологические особенности сборки высокопроизводительного DSP-процессора в 576-выводном металлокерамическом матричном корпусе с применением технологии Flip-Chip

Юрий МЯКОЧИН  
myakochin.yuri@ic-design.ru  
Александр ОШАРИН  
Владимир ЧЕШКОВ  
Александр РУДНЕВ

Эта статья продолжает серию публикаций, посвященных перспективной разработке компании «Миландр» — суперскалярному DSP-процессору с тактовой частотой 500 МГц. Ровно год назад в статье [1] мы рассказывали об архитектурных особенностях проектируемого процессора, его вычислительной мощности, а также о тех уникальных особенностях, которые позволят его использовать в отечественных высокопроизводительных системах обработки данных. В настоящей статье мы более подробно остановимся на описании конструктивных особенностей разрабатываемого процессора и технологии его изготовления.

Необходимо отметить, что проект изначально ориентирован на создание процессора для жестких условий эксплуатации, свойственных аппаратуре специального назначения. В связи с этим при разработке конструктивных решений про-

цессора значительное внимание было уделено выбору типа корпуса и применяемым межсоединениям.

На рисунке представлен конструктивный чертеж собранного процессора в металлокерамическом корпусе с 576 выводами.

Данное конструктивное исполнение процессора имеет следующие особенности:

- корпуса с wire-bond (проволочное соединение контактных площадок кристалла и траверс корпуса) не могут содержать большое количество выводов (обычно не более 256 выводов). В нашем случае этого недостаточно, так как уменьшение количества «земель»/питание ведет к увеличению тока через выводы (будет превышать допустимые значения);
- использование Flip-Chip позволяет уменьшить сопротивление в сетке «земля-питание» внутри процессора, так как не нужно вести шины от площадок ввода/вывода;
- в технологии Flip-Chip отсутствует проволочное соединение кристалла и корпуса, а значит, нет дополнительных индуктивностей, что, в свою очередь, уменьшает броски напряжений по «земле» и питанию;
- в технологии Flip-Chip тепловое сопротивление «кристалл-корпус» значительно

меньше. Это следует из того, что кристалл своей активной стороной через металлические контактные шарики передает тепло непосредственно на корпус. В случае применения wire-bond тепло передается от кристалла через всю подложку и только потом на корпус.

Использование металлокерамического корпуса позволяет значительно уменьшить тепловое сопротивление «кристалл-корпус-окружающая среда», так как его тепловое сопротивление в 5–10 раз меньше пластикового. Это ведет к необходимости применения радиаторов для отвода тепла от пластикового корпуса. Для металлокерамического исполнения корпуса радиатор, как правило, не нужен.

Основанием для корпуса служит высокотемпературная керамика (НТСС). Этот материал обеспечивает высокую механическую прочность конструкции всего корпуса и препятствует влиянию внешних факторов на полупроводниковый кристалл. Сам кристалл припаивается по технологии Flip-Chip на керамическое основание. Для этого на основание кристалла наносятся контакты в виде металлических шариков, которые при плавлении обеспечивают механическое и электрическое соединение подложки корпуса и кри-

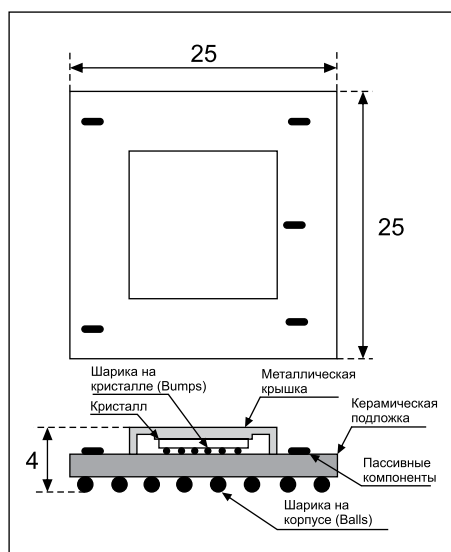


Рисунок. Конструктивный чертеж процессора

сталла. Разрабатываемый процессор имеет 1050 таких шариков на своем основании. Сверху кристалл накрывается металлической крышечкой, приваренной шовной роликовой сваркой (она же используется в качестве теплоотвода). Это соединение обеспечивает высокую герметичность, защищает полупроводниковый кристалл от влияния агрессивной внешней среды и тем самым гарантирует длительную работоспособность микросхемы при жестких условиях эксплуатации.

Для электрического и механического соединения процессора с печатной платой на нижней стороне металлокерамического основания формируются еще одни шарики. При их нагревании и оплавлении происходит соединение процессора с платой. Процессор содержит 576 выводов в виде шариков.

Таким образом, применяемая конструкция, включая использование технологии Flip-Chip для изготовления процессоров, обеспечивает их улучшенные характеристики. А это в свою очередь требует значительных финансовых вложений, поскольку подложка для процессора становится уникальной. Ее создают именно под конкретный процессор, а значит, стоимость разработки и изготовления корпуса полностью идет в затраты изготовления одной микросхемы, а не распределяется между многими ИС, как бывает в случае корпусов, где присоединение выводов осуществляется проволокой. В свою очередь заказной корпус позволяет предъявить к нему требования по определенной микросхеме. Например, в разрабатываемой ИС необходимо точно выравнять задержки в 4-битном LVDS-порту. Кроме того, на корпусе расположены пассивные элементы (резисторы номиналом 100 Ом служат в качестве терминальных резисторов LVDS-портов, а емкости — для фильтрации пульсаций по шинам питания). Размещение этих пассивных элементов на корпусе избавляет от необходимости их установки в модулях, что позволяет уменьшить размеры всей системы.

Вместе с тем сборка микросхем по технологии Flip-Chip накладывает ряд требований к материалам конструкции корпуса. Одна из сложностей в такой конструкции — различие в коэффициентах температурного расширения кремнием и материалом подложки. В микросхемах, в которых присоединение выводов кристалла в корпусе осуществляется проволокой, различие в скорости температурного расширения демпфируется проволокой, имеющей изгиб. В технологии Flip-Chip такого демпфера нет. Вот почему необходимо правильно подбирать материалы для изготовления подложки. В таблице 1 приведены значения коэффициентов температурного расширения кремния, керамики и FR4 (материал, используемый для производства пластиковых подложек для корпусов).

Как видно из таблицы 1, коэффициент температурного расширения керамики более

**Таблица 1.** Сравнение коэффициентов температурного расширения

Материал	Коэффициент температурного расширения
Кремний	3,2
Керамика	7
FR4	13

чем в 2 раза выше, нежели у кремния. В свою очередь, коэффициент температурного расширения FR4 превышает аналогичный показатель кремния в 4 раза. Это значит, что при температурных циклах (нагревание/охлаждение) механическое натяжение в шариках на кристалле будет в 2 раза выше, что может привести их к разрушению. Исследования показывают, что микросхемы с пластиковой подложкой выходят из строя менее чем через 1000 термоциклов с температурной разницей в 100 °С. Микросхемы же с металлокерамической подложкой остаются работоспособными даже после 10000 термоциклов. Следовательно, в системах, к которым предъявляются высокие требования по надежности, необходимо использовать микросхемы с металлокерамической подложкой.

Еще одним параметром, оказывающим влияние на надежность конструкции, является материал, из которого изготавливаются шарики на корпусе и на кристалле. В устройствах гражданского применения используются в основном бессвинцовые сплавы, в них олово составляет порядка 80–90%. Эти сплавы хрупкие, и поэтому при механическом натяжении они лопаются, что приводит к отказу микросхемы. В связи с этим в высоконадежных системах необходимо использовать сплавы на основе свинца. В разрабатываемом процессоре применены только сплавы на основе свинца. В таблице 2 приведены данные о материалах, из которых изготовлены элементы микросхемы.

**Таблица 2.** Материалы припоев в микросхеме

Элемент микросхемы	Материал	Температура плавления, °С
Шарики на кристалле (бамп)	95Pb5Sn	+330
Припой пассивных элементов на корпусе	95Pb5Sn	+330
Шарики на корпусе	37Pb63Sn	+215

Использование припоя с высоким содержанием свинца в шариках на кристалле обеспечивает дополнительную надежность конструкции, так как эти сплавы очень эластичны. Кроме того, применение тугоплавких сплавов для изготовления шариков на кристалле и пайки пассивных элементов препятствует их повторному расплавлению при пайке микросхемы на плате, так как температура плавления шариков на корпусе более чем на 100 °С ниже температуры плавления шариков на кристалле.

Первой и одной из важнейших задач для реализации технологии Flip-Chip является

обеспечение повторяемости присоединенных бампов к кристаллу. Эти требования относятся как к геометрии (диаметр и форма), так и к прочности крепления бампов к контактным площадкам кристалла.

Помимо механической прочности крепления бампов, не менее важным фактором является наличие качественного электрического контакта как на границе бамп-кристалл, так и на границе бамп-корпус. Препятствовать хорошему контакту может некачественное присоединение бампа (наличие пустот в пятне контакта) или образование различных интерметаллических соединений в области пайки (увеличение сопротивления граничного слоя). При плохом электрическом контакте, как и везде, наблюдается увеличение паразитных токов, снижение быстродействия элементов и увеличение количества тепла в рабочем режиме.

Для своевременного обнаружения имеющихся дефектов и для оценки качества монтажа исходных бампов на кристалле используются несколько видов тестов:

- электрический тест позволяет оценить качество контактирования бампа с самим кристаллом и величину пограничного сопротивления;
- механические испытания (pull test и shear test) позволяют оценить механическую прочность присоединенного бампа и величину его адгезии к поверхности кристалла. При данных испытаниях проверяется величина адгезии бампа в двух направлениях — вертикальном и горизонтальном по отношению к кристаллу соответственно. В зависимости от диаметра шарика величина задаваемой нагрузки на бамп составляет от 25 до 50 г. Для проведения испытаний используются специализированные механические тестеры.

При монтаже кристаллов методом Flip-Chip, помимо контролируемого усилия прижима, одной из главных задач для обеспечения качественного технологического процесса является возможность осуществления контролируемой деформации бампов. Во-первых, необходимо соблюдение строгой параллельности монтируемых изделий относительно друг друга, а во-вторых, величина деформации бампа должна быть выдержана в очень узких пределах. Недостаточная деформация неизбежно вызывает снижение прочности монтажа кристалла и плохой электрический контакт, в то время как увеличенная деформация приведет к выступанию бампа за пределы контактного окна кристалла с дальнейшей вероятностью разрушения диэлектрика и замыкания.

Таким образом, очевидно, что монтаж кристаллов методом Flip-Chip — весьма сложный технологический процесс, объединяющий два традиционных процесса (монтаж кристаллов в корпус и присоединение проволочных выводов). Проблемы и сложности реализации данного метода

рассмотрены в статье далеко не в полном объеме. Однако, несмотря на целый ряд технологических особенностей, применение данного метода является наиболее перспективным. При его реализации решается целый комплекс задач, таких как:

- уменьшение размеров корпуса (в отдельных случаях до 50%);
- уменьшение индуктивности межсоединений (до 10 раз) и их сопротивления;

- увеличение скорости и качества передачи сигнала и т. д.

В компании «Миландр» в данный момент создается полный цикл проектирования микросхем, выпускаемых по технологии сборки методом Flip-Chip. Создание этого маршрута позволит контролировать процесс разработки таких сложных микросхем, как проектируемый DSP-процессор, начиная от написания модели на Verilog до сборки кристалла в корпус с после-

дующим и всесторонним его тестированием. Контроль на каждом этапе позволяет выпускать изделия, которые могут применяться в системах с повышенными требованиями к надежности. ■

### Литература

1. Мякочин Ю. 32-разрядный суперскалярный DSP-процессор с плавающей точкой // Компоненты и технологии. 2013. № 7.