

Особенности разработки органического корпуса для многокристальных сборок на основе чиплетов

А.А. Подковыров¹, А.В. Андреев²

¹НИИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ, Москва, Россия, barfev@cs.niisi.ras.ru;

²НИИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ, Москва, Россия, alandreev@cs.niisi.ras.ru

Аннотация. В работе рассматривается разработка и методика проектирования органического корпуса с шариковыми выводами типа BGA (Ball Grid Array) с двумя кристаллами, соединенных между собой высокоскоростными интерфейсами. Описаны особенности топологии корпуса на основе чиплетов. Рассмотрены основные технологии и этапы разработки. Проведен обзор разработок зарубежных аналогов.

Ключевые слова: чиплет, система в корпусе, корпусирование, технология «перевернутого кристалла», многокристальный модуль

1. Введение

Технология чиплетов в наши дни завоевывает огромную популярность в полупроводниковой промышленности. Чиплеты представляют собой специально разработанные кристаллы, которые способны работать в системе вместе с себе подобными внутри корпуса. Несколько чиплетов представляют собой одну сложную микросхему с общей подложкой. Их использование сокращает время разработки нового устройства и снижает затраты за счет интеграции разработанных чипов в многокристальный модуль (МКМ). Они коммутируют между собой соединениями внутри подложки, а после интерфейсные сигналы проходят к массиву шариковых выводов (BGA). Самыми первыми компаниями-гигантами, которые разработали устройства на базе чиплетов, стали Intel и AMD [1].

Корпус на основе чиплетов разрабатывался на предприятии ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. Он предназначен для отработки технологии создания специализированных СБИС в виде системы в корпусе (СвК), состоящих из чиплетов на подложке и оптимизированных по эффективности и технологической доступности для отечественных дизайн-центров.

2. Система в корпусе

Технология система в корпусе (СвК) представляет собой расположение в одном корпусе нескольких СБИС, в котором они подключены между собой.

СвК имеет ряд преимуществ, помимо интеграции нескольких функций, такие как:

- миниатюризация;
- повышенная надежность, увеличение производительности;
- улучшенная электромагнитная совместимость и целостность сигнала;

- невысокие финансовые и временные затраты на разработку [2].

У этой технологии огромный потенциал, поскольку каждый блок СвК может создаваться отдельной группой специалистов, что сокращает время разработки и позволяет подавать на финальную сборку уже испытанные комплектующие.

Систему обычно подразделяют по пространственным расположением функциональных блоков внутри корпуса, по которым определяется возможность применения в СвК различных типов конструктивного исполнения компонентов и технологий сборки и монтажа. Классифицируют СвК на следующие группы:

- сборка и монтаж блоков в одной плоскости (2D);
- сборка и монтаж блоков через промежуточную подложку/сигнальный мост (2.5D);
- сборка и монтаж блоков в трехмерном пространстве (3D) [3].

3. Обзор зарубежных аналогов

В массовых продуктах чиплеты появились в 2017 году. Они были использованы в процессорах AMD из линейки Ryzen Threadripper. Два кристалла Zeppelin устанавливались на одной подложке, что способствовало двухкратному увеличению ядер, по сравнению с процессорами Ryzen 1000 серии – с 8 до 16 ядер.

На сегодняшний день количество чиплетов у передовых компаний может достигать двузначных значений. К примеру, AMD изготовило новое поколение серверных процессоров EPYC с 12-ти процессорными чиплетами в корпусе. Вместе с чипом ввода-вывода кристаллов у таких процессоров будет 13, а количество ядер составит 96. Этот процессор построен на архитектуре Zen4 под кодовым названием Genoa (рисунок 1).

Без чиплетной технологии на данный момент столько ядер в одном процессоре реализовать было бы практически невозможно.

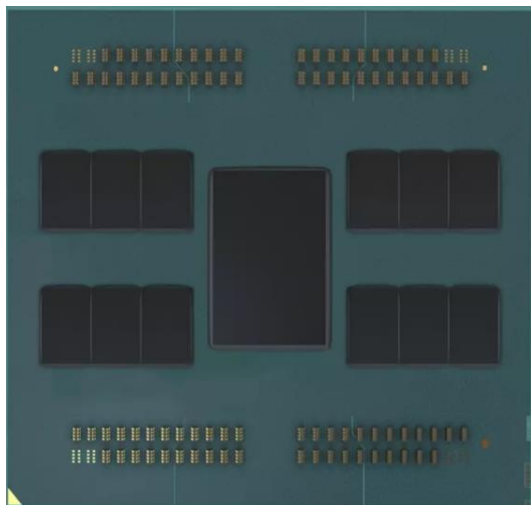


Рис. 1. Серверный процессор AMD EPYC на базе 12-чиплетного дизайна

Сейчас AMD применяет одни и те же чиплеты в большинстве линеек своих процессоров. То есть AMD на производстве TSMC просто тиражирует кристаллы, к примеру, по 7-нм нормам для различных изделий, что продемонстрировано на рисунке 2. Чиплетная технология позволяет свободно комбинировать гетерогенные функциональные блоки внутри составной микросхемы в зависимости от её предназначения.

Изготавливать кристаллы настолько небольшого размера крайне выгодно. Повышается выход годных: чем меньше размер, тем выше выход годных. На одной пластине размещается существенно большее число кристаллов, а значит, при равной стоимости изготовления пластины каждый отдельный процессор становится, соответственно, дешевле, о чем еще будет подробнее сказано в главе 5 [4].

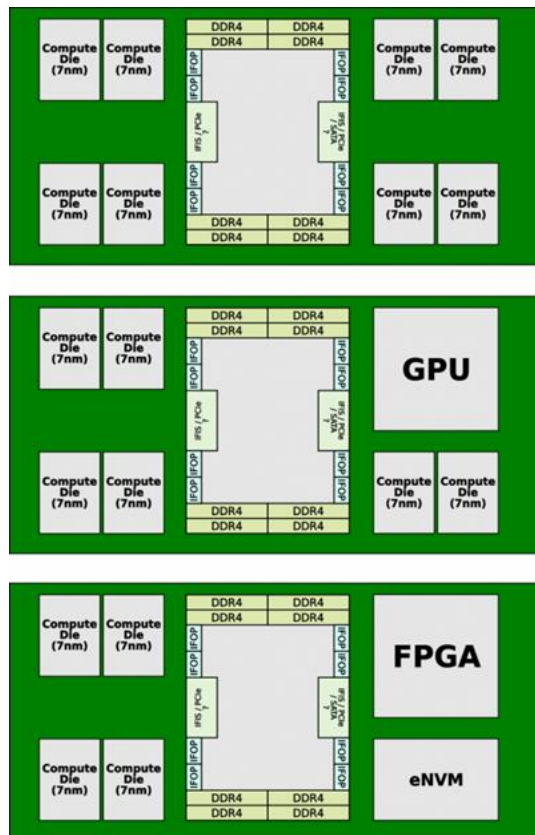


Рис. 2. Различные комбинации чиплетных блоков от AMD

В 2023 году AMD представила первый мобильный чип, оснащённый дополнительной кэш-памятью 3D V-Cache. Процессор имеет 16 ядер с поддержкой 32-х потоков и работает с тактовой частотой до 5,4 ГГц. Базовая частота чипа составляет 2,3 ГГц. Ryzen 9 7945HX3D состоит из трёх чиплетов, два из которых – 8-ядерные на микроархитектуре Zen 4 (Core Complex Die, CCD) и один чиплет ввода-вывода. Технологический процесс 5-нм. На один из CCD установлен кристалл с дополнительной кэш-памятью 3-го уровня (L3) объёмом 64 Мб. С учётом того, что в каждом CCD уже присутствует по 32 Мб кэш-памяти L3, общий её объём составляет 128 Мб, а вместе с кэш-памятью 2-го уровня (L2) суммарный объём доходит до 144 Мб [6,7].

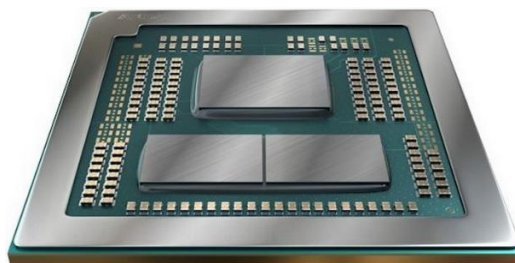


Рис. 3. AMD Ryzen 9 7945HX3D

В 2023 году на проходившей в Стэнфордском университете конференции по микропроцессорам «Hot Chips», Intel показала превью своих серверных процессоров Xeon Scalable 6-го поколения Sapphire Rapids (рисунок 4) для демонстрации передовых технологий упаковки. Процессоры с многочиповой архитектурой, предназначенные для центров обработки данных, должны появиться в этом году. Компания в настоящее время проводит тестирование среди своих клиентов.

Процессор Intel Xeon Granite Rapids 6-го поколения имеет структуру с пятью чиплетами: три больших по центру коммутируют между собой через каналы EMIB - встроенный многослойный межкомпонентный мост. Эти три чипа содержат ядра производительности с 2 Мб кэш-памяти L2, 4 Мб кэш-памяти L3 и четыре интерфейса DDR5. Два меньших чиплета по краям с высокоскоростными интерфейсами ввода-вывода (HSIO). Предполагается, что процессоры Granite Rapids будут иметь 12 каналов памяти DDR5 с поддержкой модулей DDR5-6400 и MCR DIMM, 136 линий PCIe Gen5 с поддержкой CXL 2.0 и до шести каналов UPI.

Ожидается, что серийные процессоры будут иметь от 84 до 90 ядер. Частота работы ядер составляет от 1,1 до 2,70 ГГц в инженерных образцах процессоров.

Чиплеты процессора выпускаются по техпроцессу Intel 3 (3-нм), в то время как чиплеты HSIO производятся на техпроцессе 7-нм для оптимальной производительности и эффективности затрат.

Платформа Intel Granite Rapids может поддерживать от одного до восьми сокетов на сервере [8].

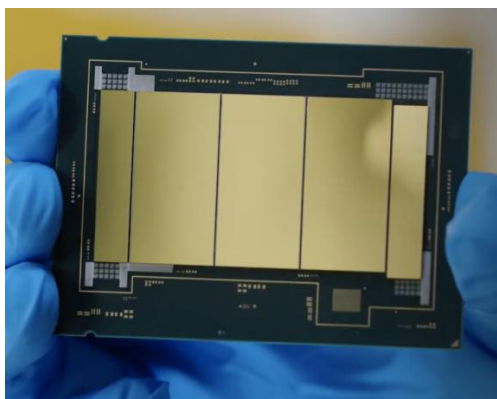


Рис.4. Intel Xeon Granite Rapids 6-го поколения

Чиплеты можно интегрировать как в 2D структуре, как в предыдущих примерах, так и в 3D структуре по методу монтажа «Package-on-

Package» (PoP).

Компанией Intel в 2019 году был представлен процессор под кодовым названием Lakefield. Он представляет собой гетерогенное многочиповое решение, объединяющее в модуле одно 10-нм большое высокопроизводительное вычислительное ядро (микроархитектура Sunny Cove) и четыре 22-нм мелких энергоэффективных ядра (Tremont).

На рисунке 5 указаны основные блоки 10-нм чипа.

Габариты 12 x 12 x 1 мм.



Рис.5. Основные блоки 10-нм чипа Lakefield

Lakefield имеет новую технологию Foveros 3D, которая предусматривает многослойное размещение элементов в одном пакете, что создаёт настоящую систему на чипе (рисунок 6). Каждый слой включает в себя отдельные компоненты, добавленные с помощью 3D-интеграции (рисунок 7).

В процессоре также интегрировано графическое ядро Intel Gen11, обеспечивающее хорошую графическую производительность

Lakefield разрабатывался для использования в мобильных устройствах, таких как ноутбуки, планшеты и гибридные устройства, где энергоэффективность и производительность являются ключевыми характеристиками.

Цель Intel при разработке процессора Lakefield состояла в создании решения, которое бы предлагало эффективное использование вычислительных ресурсов, высокую производительность и долгую автономную работу для мобильных устройств, и это стало возможным благодаря использованию чиплетов и технологии Foveros [5,9,10].



Рис.6. Стековая архитектура Lakefield

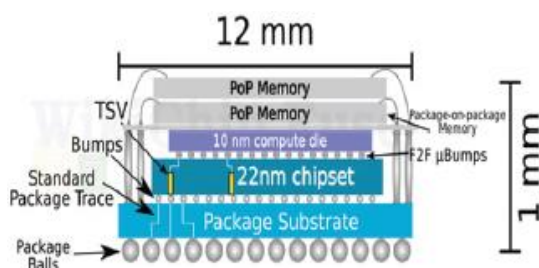


Рис.7. Структура процессора Lakefield

AMD и Intel являются главными конкурентами на мировом рынке процессоров и задают всем странам тренд для развития технологий и усовершенствования в этой области. Гетерогенная интеграционная в корпусе с использованием технологии чиплетов предоставляют альтернативу системе на кристалле, особенно при использовании малых технологических норм, которые большинство компаний не могут себе позволить.

4. Технология «перевернутого кристалла» («Flip-chip»)

Flip chip (перевернутый чип) — это метод монтажа чипа на печатные платы или другие подложки, при котором кристалл микросхемы устанавливается на выводы, расположенные на его контактных площадках, равномерно распределенных по поверхности кристалла микросхемы. Главной особенностью и одновременно большим преимуществом данной технологии является то, что кристалл монтируется напрямую, без дополнительных соединительных проводов, активной контактной стороной вниз – к подложке.

Эта технология считается самой распространенной, поскольку, на сегодняшний день, ни одна высокоинтегрированная «система в корпусе», либо многокристальная сборка не обходится без применения данного метода установки

кристалла.

Этот метод был создан компанией IBM в 1961 и тогда назывался SLT (Solid Logic Technology). Тогда предполагалось использование покрытых припоем медных столбиковых выводов. В 1965 году IBM создала технологию Flip chip C4 (Control Collapse Chip Connection). В Flip chip C4 уже использовались шарики, полностью из припоя. Они подразумевают собой припойные бампы кристалла диаметром от 100 мкм и более. У этого метода есть ряд преимуществ по сравнению с проволочным монтажом wire bonding, такие как:

- минимальные массогабаритные показатели и быстродействие;
- улучшенные электрические характеристики электронных компонентов за счёт коротких соединений проводников;
- меньшее количество соединений, что сокращает количество потенциальных узлов отказа и обеспечивает более эффективное распределение тепловой энергии;
- низкая стоимость материалов;
- малые размеры корпуса;
- большее количество выводов;
- высокая плотность сигнала;
- низкая сигнальная индуктивность и хорошее подключение питания/земли;
- идеально подходит для высокоскоростных интерфейсов;
- лучшее рассеивание мощности.

К недостаткам этой технологии можно отнести высокие значения механических напряжений в контактах, вызванные малой пластичностью выводов. Для их уменьшения, а также повышения прочности и теплоотвода, в 1987 году компания Hitachi впервые применила при flip-chip монтаже свертхтекущий компаунд для инкапсуляции (заполнения пространства между смонтированным кристаллом и подложкой), который называется underfill. На рисунке 8 схематически показаны крепления кристалла при помощи двух

типов монтажа.

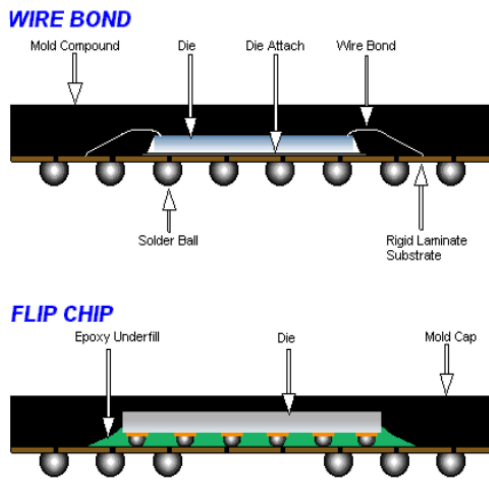


Рис.8. Крепление кристалла в корпусе: с помощью проволочных соединений (wire bonding); методом «перевернутого кристалла» («flip-chip»)

В наши дни многие компании используют технологию flip-chip для изготовления миниатюрных и беспроводных электронных устройств. Ее применение позволяет уменьшать размеры микросхемы, например, с чиплетными сборками, а, следовательно, это приводит к увеличению ее применения в таких значимых областях, как искусственный интеллект, военная и аэрокосмическая промышленность, телекоммуникации.

5. Этапы разработки корпуса

Подразделяются на следующие:

- написание ТЗ: на каждый кристалл выдается свое частное техническое задание для корпусирования, связанное с его функциональным назначением;
- на этом этапе подбирается вид корпуса, в зависимости от количества развариваемых выводов и типа монтажа. Если тип монтажа проволочный (wire bond), то подбирается материал проволоки и форма профиля. Так же подбирается материал корпуса в зависимости от назначения будущей микросхемы;
- преемственность топологии при модернизации корпуса: для того, чтобы учесть замену чиплета на другой, нужно предусмотреть использование универсального посадочного места, чтобы без дополнительных затрат и технических решений произвести замену.
- разработка топологии корпуса в соответствии с требованиями используемых интерфейсов и габаритами;
- моделирование - после разработки топологии необходимо промоделировать на целостность сигналов и питания для того, чтобы исключить все неточности и создать надежную микросхему для разных условий эксплуатации;

- реализация - после успешного моделирования на этапе реализации создается КД, где вносятся все необходимые требования по корпусированию в соответствии с требованиями завода-изготовителя;

- тестирование - при получении готовой микросхемы необходимо проверить и протестировать ее в разных условиях эксплуатации, в которых она должна функционировать;
- установка - транспортировка и установка микросхемы на печатную плату;
- функциональное тестирование в составе модуля или целостного устройства.

Главной отличительной особенностью разработки чиплетного корпуса от обычного является создание межсоединений между кристаллами в соответствии с ТЗ на микросхему. Это относится к четвертому пункту – разработке топологии корпуса.

6. Преимущества и недостатки применения чиплетов

Монолитные кристаллы для процессоров достаточно крупные, и при использовании кремниевых пластин типоразмера 300 мм остается достаточно много «лишних» частей, которые потом утилизируются. Таким образом, при использовании меньших кристаллов чиплетов можно задействовать большую площадь пластины, что будет более выгодно в техническом и экономическом плане. Наглядно это можно увидеть на рисунке 9.

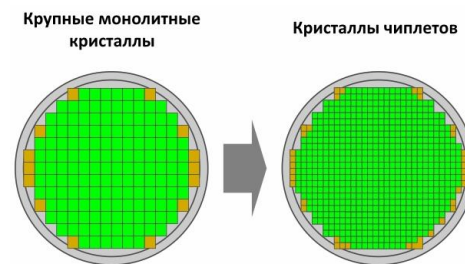


Рис.9. Варианты использования кристаллов

Технология чиплетов дает возможность разрабатывать заменяемые и повторно используемые полупроводниковые блоки, а также в зависимости от того, какие функции целевой микросхемы выполняет чиплет, имеется возможность комбинирования различных техпроцессов в системе из чиплетов. Это значительно снижает затраты на разработку и упрощает тестирование.

При использовании новой технологии поначалу всегда будут свои трудности и недостатки. Например, коммутация чиплетов происходит через проводники внутри подложки, что приводит к дополнительным задержкам при передаче информации.

На рисунке 10 можно хорошо заметить, как

влияет и насколько выгоден переход к чиплетному дизайну, по сравнению с монолитной СБИС [5]. По вертикали указано количество годных микросхем на пластине-заготовке (%). По

горизонтали – их площадь (мм²). С ростом габаритов чипа значительно уменьшается выход годных чиплетов.

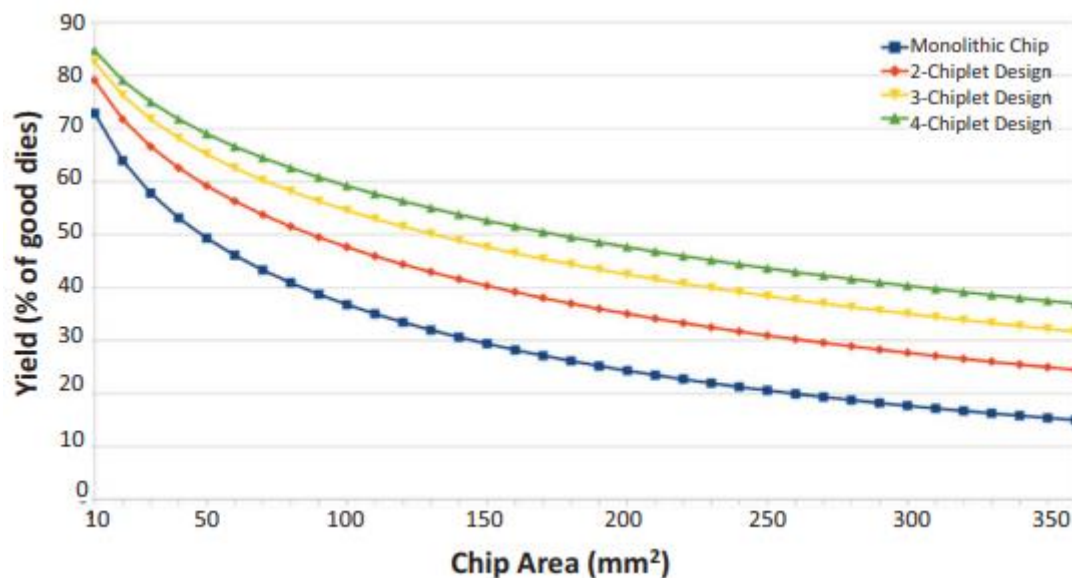


Рис. 10. График отношения площади кристалла к выходу годных

7. Особенности и требования к топологии разрабатываемого корпуса

Одной из особенностей разводки корпуса является применение стеков переходных отверстий через 4 слоя. В разработке были использованы два таких стека: TOP-INT4 для линий интерконнекта и INT1-CORE1 для подключений дифференциальных пар интерфейса TRS, как показано на рисунке 11.

При проектировании топологии корпуса на основе чиплетов в первую очередь в слое TOP и INT1 преимущественно выводятся цепи питания и земли. Для удобства и более равномерной разводки дифференциальных пар, а также для исключения их удлинения, было решено создать симметричную структуру переходных (рисунок 12), что позволяет при зеркальной перестановке двух коротких проводников в слое INT3 быстро изменить полярность подключения на шариковые выводы, как требуется.

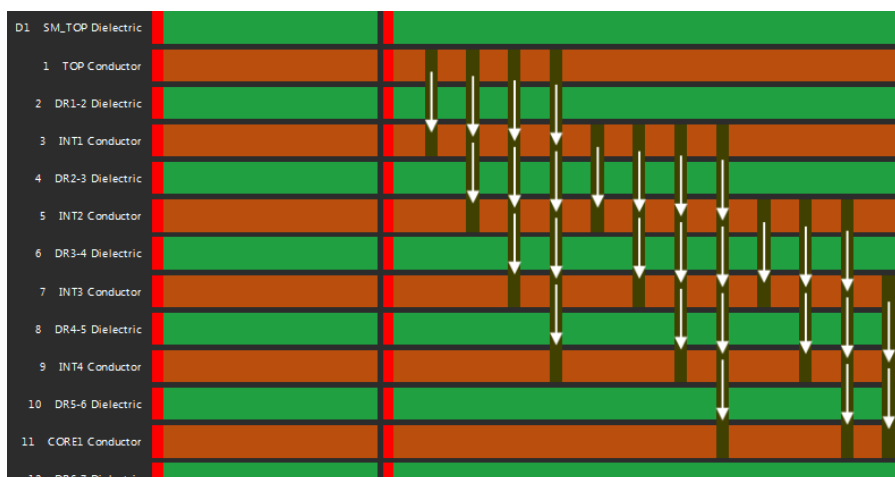


Рис. 11. Структура слоев корпуса для чиплетов

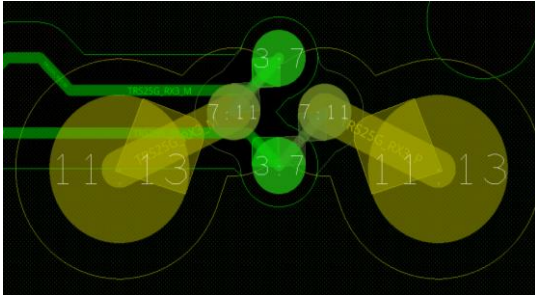


Рис. 12. Симметричная структура переходных для подключения дифференциальных пар

На корпусе микросхемы установлены резисторы с минимальным допуском на калибровочных дифференциальных линиях высокоскоростных портов, которые позволяют:

- сократить длину проводников к резисторам;
- сэкономить полезную площадь в корпусе и печатной плате;
- уменьшить количество шариковых выводов в корпусе и компонентов на плате.

В корпусе установлены два кристалла. На скриншоте (рисунок 13) слева находится ответный чиплет, а центре второй - интерфейсный. Они объединены между собой межсоединительной высокопроизводительной шиной AXI. Сама микросхема содержит следующие интерфейсы, которые выводятся на печатную плату:

- высокоскоростные: PCIe, DDR, HDMI, DPRT;
- интерфейсы для отладки: UART, JTAG, I2C.

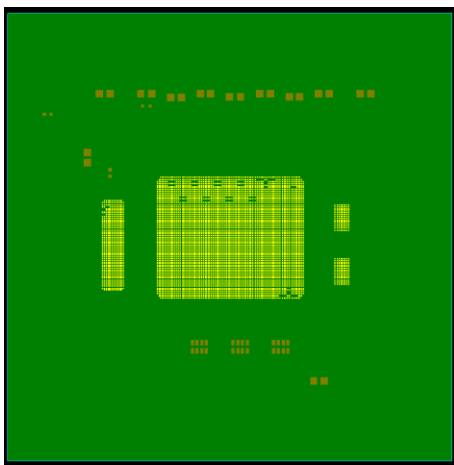


Рис. 13. Скриншот слоя TOP

Количество слоев и их толщина указаны в таблице 1.

Таблица 1. Используемые слои в корпусе

	Название	Слой	Толщина (мкм)
1	SM_TOP	Mask	10
2	TOP	Conductor	15
3	DR1-2	Dielectric	30
4	INT1	Conductor	15
5	DR2-3	Dielectric	30
6	INT2	Conductor	15
7	DR3-4	Dielectric	30
8	INT3	Conductor	15
9	DR4-5	Dielectric	30
10	INT4	Conductor	15
11	DR5-6	Dielectric	30
12	CORE1	Conductor	15
13	DR6-7	Dielectric	800
14	CORE2	Conductor	15
15	DR7-8	Dielectric	30
16	INT11	Conductor	15
17	DR8-9	Dielectric	30
18	INT12	Conductor	15
19	DR9-10	Dielectric	30
20	INT13	Conductor	15
21	DR10-11	Dielectric	30
22	INT14	Conductor	15
23	DR11-12	Dielectric	30
24	BOTTOM	Conductor	15
25	SM_BOT	Mask	10

8. Заключение

В статье были представлены некоторые особенности топологии органического корпуса для многокристальных сборок на основе чиплетов. Представлены основные технологии, используемые при разработке. Применение корпусов на основе чиплетов позволяет улучшить компактность, увеличить скорость и производительность систем, отвечая вызовам современных вычислительных модулей. Дальнейшее исследование в данной области позволит совершенствовать технологии чиплетов и расширять возможности интеграции элементов в высокотехнологичные системы.

Публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме FNEF-2024-0003.

Features of the Development of an Organic Package for Multi-Chip Modules Based on Chiplets

A.A. Podkovyrov, A.V. Andreev

Abstract. The paper discusses the development and design methodology of an organic package with BGA (Ball Grid Array) ball leads with two crystals connected by high-speed interfaces. The features of the chiplet topology are described. The main technologies and stages of development are considered. A review of the developments of foreign analogues was carried out.

Keywords: Chiplet, System-in-Package (SiP), packaging, Flip-Chip technology, multi-chip module

Литература

1. Баранов А.М., Подковыров А.А., Андреев А.В. Проблемы и направления развития микросхем с перевёрнутым кристаллом. Труды НИИСИ РАН. 2024. Т. 14. № 1. С. 4-10.
2. Вертянов Д., Сидоренко В., Тимошенков С., Ковалев А. Перспективные конструктивно-технологические решения для производства «систем-в-корпусе» // Технологии в электронной промышленности. 2019. № 4. С. 60–64.
3. В. Мейлицев Системы в корпусе. Краткий обзор технологий // Электроника НТБ. 2021. Выпуск 2. С. 108-113.
4. Бобков С.Г. Технология чиплетов – перспективное направление развития российской микроэлектроники // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2022. № 1 (185). С. 42-51.
5. Lau, J. H., «State-of-the-Art and Outlooks of Chiplets Heterogeneous Integration and Hybrid Bonding», Journal of Microelectronics and Electronic Packaging (2021) 18, 145–160.
6. AMD представила Ryzen 9 7945HX3D — первый мобильный процессор с дополнительной кэш-памятью 3D V-Cache. URL: <https://3dnews.ru/1090674/amd-predstavila-ryzen-9-7945hx3d-perviy-mobilniy-protessor-s-dopolnitelnoy-keshpamyatyu-3d-vcache> (дата обращения 5.06.2024).
7. AMD представила аналог Ryzen 9 7950X3D для ноутбуков — 7945HX3D предлагает 144 МБ кэш-памяти L2+L3. URL: <https://overclockers.ru/blog/molexandr/show/100816/amd-predstavila-analog-ryzen-9-7950x3d-dlya-noutbukov-7945hx3d-predlagaet-144-mb-kesh-pamyati-l2-l3> (дата обращения 5.06.2024).
8. Intel представила процессоры Granite Rapids с пятью чиплетами. URL: https://overclockers.ru/blog/andr_83/show/108238/intel-predstavila-processory-granite-rapids-s-pyatju-chipletami (дата обращения 6.06.2024).
9. Intel рассказала о первом гибридном процессоре Lakefield. URL: <https://nvworld.ru/news/intel-announced-lakefield/> (дата обращения 6.06.2024).
10. 5-ядерный процессор Intel Lakefield замечен в базе данных 3DMark. URL: https://ru.gecid.com/news/5-yadernyj_processor_intel_lakefield_zamechen_v_3dmark (дата обращения 7.06.2024).