

Новый процессор 88000 фирмы Motorola¹

Том Мануэль

Архитектура микропроцессоров семейства 88000 предполагает размещение целочисленного блока и блока с плавающей точкой на кристалле центрального процессора 88100 и комбинированные устройства управления памятью с кэш-памятями данных и команд. Такой трехкристальный комплекс является по утверждению фирмы Motorola первым RISC-микропроцессором третьего поколения.

Тщательно проведенная разработка завершена, и фирма Motorola Inc. начинает наконец раскрывать детали построения своего семейства 88000, новейшего семейства RISC-микропроцессоров². То, что сейчас демонстрирует эта фирма, — впечатляющий комплект из трех кристаллов, реализующих все функции, необходимые для создания машин по архитектуре компьютера с сокращенным набором команд (RISC); фирма Motorola называет свой комплект первым RISC-микропроцессором третьего поколения.

Базовый комплект MC88000 содержит кристалл процессора и два идентичных кристалла кэш-памяти, один из которых предназначается для хранения данных, а другой — команд. Процессор — это прибор 88100, построенный на базе небольшого эффективного регистрового блока с табличным

распределением регистров (по методу scoreboard — «табло») и содержащий вычислительные блоки для выполнения как целочисленных операций, так и операций с плавающей точкой. При работе на тактовой частоте 20 МГц его номинальное быстродействие, по данным фирмы Motorola, в миллионах команд в секунду эквивалентно суммарному быстродействию семнадцати компьютеров VAX-11/780 корпорации DEC, а при измерении по методу Драйстоуна составляет 34 000 операций/с, что делает его одним из наиболее быстродействующих существующих RISC-процессоров. Кристалл кэш-памяти 88200 выпускается с встроенным устройством управления памятью (УУП) (рис. 1).

Как заявляют представители фирмы Motorola, отнести это семейство к RISC-архитектуре третьего поколения позволяет то, что на кристалле процессора 88100 комбинируется устройство для выполнения целочисленных операций и операций с плавающей точкой, а подсистема кэш-памяти 88200 содержит встроенное устройство управле-

¹ Tom Manuel. Taking a close look at the Motorola 88000, No. 9, pp. 75—78.

² Электроника, 1988, № 4, «Методы, схемы, аппаратура».

ния памятью. По словам представителей фирмы Motorola, RISC-машины первого поколения были чисто исследовательскими — это проект 801 корпорации IBM и проекты Станфордского университета и Калифорнийского университета в Беркли. Второе поколение — это RISC-микропроцессоры, которые сейчас выпускаются на рынок и не имеют указанных встроенных средств кэш-памяти семейства MC88000. Главное преимущество архитектуры 88000 — способность параллельного выполнения многих операций. Блок данных, размещаемый на кристалле процессора, позволяет осуществлять обмен данными между кэш-памятью данных и регистровым блоком, а блок команд — обмениваться командами между кэш-памятью команд и регистровым блоком. Одновременно устройство для обработки целых чисел и полей битов будет выполнять команды параллельно с операциями, происходящими в блоке с плавающей точкой, состоящем из двух подблоков. Эти возможности параллельной работы, предусмотренные в комплекте кристаллов, позволяют создавать два особенно важных вида систем, для которых, как заявляет фирма Motorola, не пригоден ни один другой RISC-процессор; речь идет о многопроцессорных и отказоустойчивых системах.

Основой архитектуры нового семейства является регистровый блок процессора. «В этом заключается ключевое различие между нашей и другими RISC-архитектурами, — говорит Роджер Росс, ответственный за усовершенствованные микропроцессоры и руководитель группы разработчиков в объединении микропроцессорных изделий фирмы Motorola в Остине, шт. Техас. — С самого начала мы проектировали регистровый блок такого типа, который, как мы считали, необходим для усовершенствованного RISC-процессора, так что этот регистровый блок расширяет возможности архитектуры, а не усложняет ее».

Очень важное значение имел выбор размера регистрового блока. Он должен быть достаточно большим, чтобы удовлетворять нужды компьютера, но не настолько большим, чтобы его среднее время реакции стало слишком длительным. Необходимость создания хорошего сверхвысокоскоростного регистрового блока в этом случае была особенно настоятельной, поскольку данный блок должен обслуживать многие функциональные устройства, работающие параллельно.

Разработчики решили создать небольшой эффективный регистровый блок, причем применили для его построения принципы суперкомпьютерной архитектуры, аналогичные принятым в машинах компании Cray. Процессор 88100 (рис. 2) содержит регистровый блок из тридцати двух 32-бит регистров с встроенной схемой табличного распределения регистров, которая следит за состояниями регистров, так что программистам не

приходится об этом беспокоиться. Когда собирается вся необходимая информация, регистровый блок дает сигнал к началу выполнения операций различных функциональных устройств.

Затем инженеры фирмы Motorola разработали оригинальную внутреннюю шину кристалла, так называемую кремниевую шину, соединяющую регистровый блок с параллельно работающими специальными функциональными устройствами. Каждое специальное функциональное устройство процессора 88100 имеет свой адрес на шине. Что касается ввода-вывода, то разработчики выбрали полную Гарвардскую архитектуру. Это означает, что они целиком разделили устройство ввода-вывода для данных и команд, причем каждое устройство ВВ реализовали с полным 32-бит трактом для обработки как адресов, так и данных.

Адрес кремниевой шины, привязанный к команде, определяет, какое из специальных функциональных устройств должно выполнять эту команду. Специальное функциональное устройство 0, блок для выполнения операций над целыми числами и над полями битов, используется для выполнения всех одноктактных команд.

Операции с плавающей точкой требуют более одного такта, и для обеспечения их выполнения разработчики семейства 88000 отошли от одного из основных старых принципов RISC-архитектуры, заключающегося в том, что команды с плавающей точкой должны быть исключены из архитектуры процессора. Разработчики первых RISC-микропроцессоров игнорировали команды с плавающей точкой, поскольку их нельзя выполнять за один такт. Росс и его группа разработчиков решили, что команды с плавающей точкой и тем самым блок для выполнения операций с плавающей точкой должны принадлежать тракту обработки данных RISC-машины. Поэтому они создали параллельный блок с плавающей точкой, названный ими специальным функциональным устройством 1, состоящим из двух частей: умножителя и сумматора.

Блок с плавающей точкой — неотъемлемая часть структуры RISC-процессора, обладающая равными возможностями доступа к регистровому блоку, кремниевой шине и к блокам данных и команд. В каждом такте может начинаться выполнение двух операций с плавающей точкой, одного сложения и одного умножения. Здесь не приходится терять в скорости из-за необходимости обращаться к внекристалльным средствам для выполнения операций с плавающей точкой.

Архитектура семейства 8800 предусматривает необычайные возможности расширения. Например, разработчики из фирмы Motorola зарезервировали 256 кодов операций для каждого специального функционального устройства, а также выделили дополнительные адреса кремниевой

Структура комплекта кристаллов 88000 фирмы Motorola

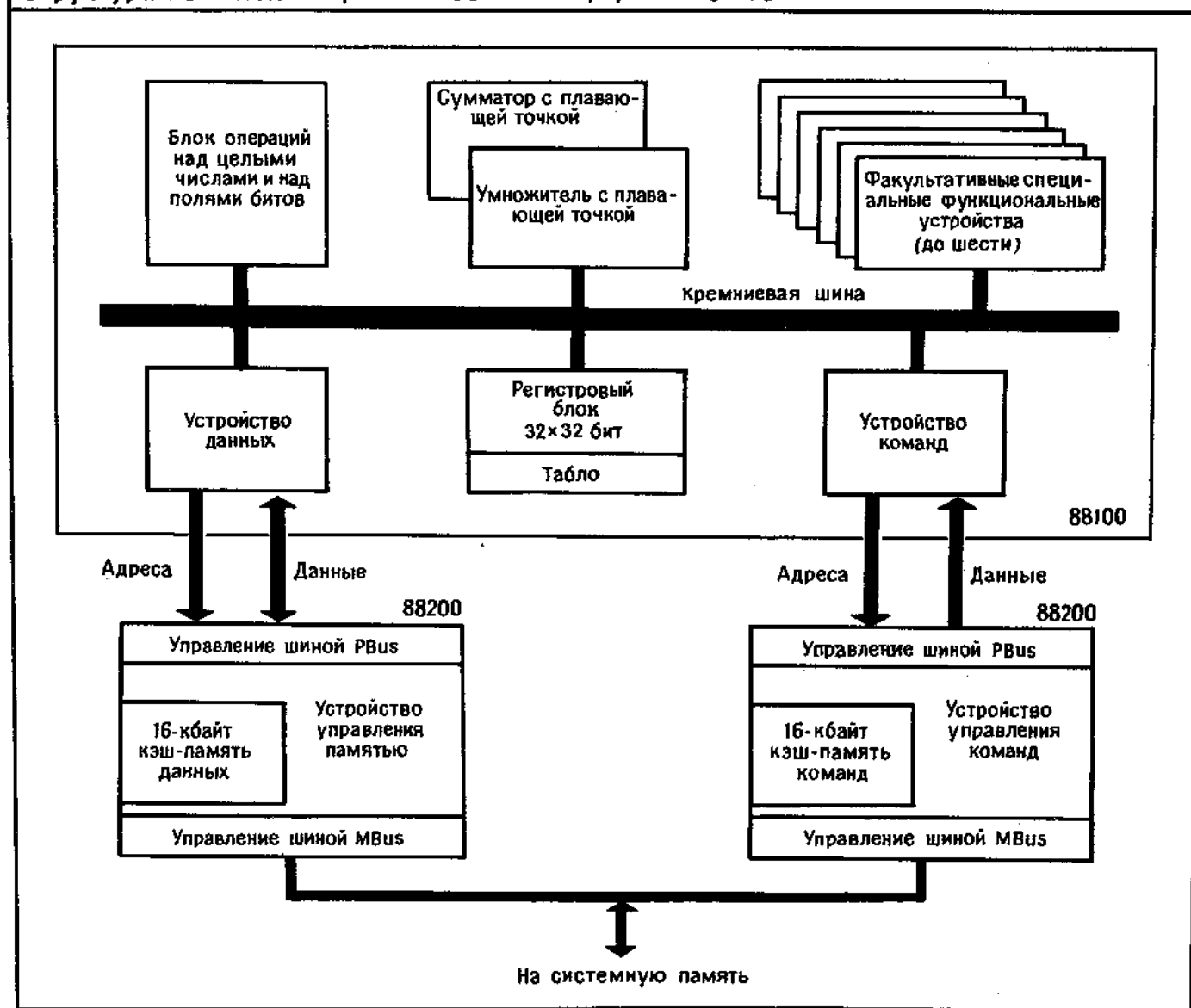


РИС. 1. Комплект кристаллов 88000 состоит из одного процессора 88100 и двух идентичных кристаллов кэш-памяти/устройства управления памятью 88200 — по одному для команд и для данных.

шины для шести будущих специальных функциональных устройств — с номерами от 2 до 7. Поскольку кристаллы семейства 88000 проектировались при помощи инструментальных средств кремниевой компиляции (см. «Каким образом фирме Motorola удалось разработать и изготовить свои RISC-кристаллы всего за двадцать месяцев»), фирма Motorola сможет достаточно легко вводить специальные функциональные устройства при возникновении необходимости — путем перекомпиляции кристаллов. Новые коды операций реализуются в зарезервированных местах; при этом старые коды остаются нетронутыми, так что новый вариант процессора остается совместимым с предыдущими вариантами на уровне двоичных кодов программ.

Заказчики могут сами вводить дополнительные специальные функциональные устройства; для этого они должны разработать устройство со своими собственными командами, а фирма Motorola реализует его. Фирма Motorola сообщает, что она уже работает с одним заказчиком (имени которого не называет), чтобы на практике убедиться в возможности создания первого подобного дополнительного устройства.

Пользователям предоставляется также возможность спроектировать специальное функциональное устройство и реализовать его программным способом для целей отладки — поскольку если в программе встречается один из резервированных кодов операций, пока еще не реализованный аппаратно, происходят преры-

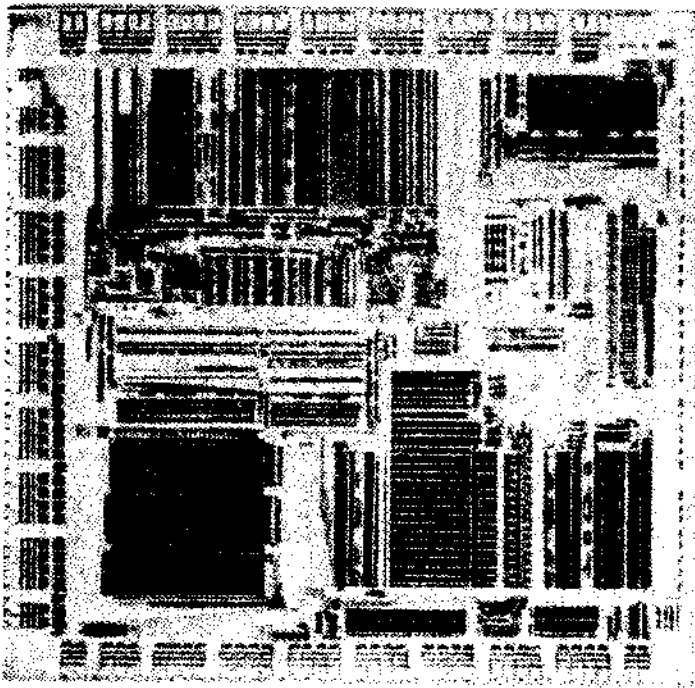


РИС. 2. В процессоре 88100 фирмы Motorola используется несколько функциональных устройств, работающих под управлением регистрового блока с табличным распределением регистров.

вание и передача управления программным средствам. Другими словами, пользователи могут включать команды нового устройства в свои программы. До тех пор пока не будет скомпилирован кристалл с новой аппаратурой, такие программы будут выполняться с использованием программно-реализованных вариантов этих команд.

Процессор 88100 — это одна половина RISC-проекта фирмы Motorola; вторая, не менее важная половина — это подсистема кэш-памяти 88200 с встроенным УУП. Данная подсистема предназначена для работы с четырехпортовой Гарвардской архитектурой процессора с 32-бит портами адресов и данных блока данных, который подключается к банку, содержащему до четырех подсистем кэш-памяти/УУП. Две аналогичные группы 32-бит линий блока команд соединяются с собственной подсистемой кэш-памяти, которая также может иметь до четырех кристаллов кэш-памяти/УУП. Максимум четыре кристалла кэш-памяти — это физическое ограничение, налагаемое применением КМОП/ТТЛ-схем. Когда комплект кристаллов будет реализован по другим технологиям, количество кристаллов можно будет увеличить — архитектура допускает использование до 128 кристаллов на секцию данных и команд.

Разработчики из фирмы Motorola решили выполнить кэш-память 88200 по множественно (мо-

дульно)-ассоциативному (set-associative) принципу, а не по принципу прямого отображения. В первом случае каждому адресу основной памяти могут соответствовать две или более ячеек кэш-памяти, а во втором случае каждой ячейке основной памяти назначается конкретный адрес кэш-памяти.

Множественно-ассоциативный принцип управления кэш-памятью существенно уменьшает вероятность «пробуксовки» возникающей в кэш-памяти прямого отображения, когда два последовательно используемых адреса сталкиваются в этой кэш-памяти.

Кристалл 88200 — это полная подсистема множественно-ассоциативной кэш-памяти на четыре направления и УУП с высокоскоростным статическим кэш-ЗУПВ емкостью 16 кбайт на кристалле. Эффективная секция управления шиной памяти автоматически обеспечивает когерентность кэш-памяти при работе в многопроцессорных конфигурациях. Реализованная в кристалле 88200 множественно-ассоциативная организация кэш-памяти обеспечивает отображение каждой ячейки основной памяти на четыре ячейки кэш-памяти, что способствует уменьшению вероятности столкновений между адресами основной памяти в кэш-памяти. Кристалл 88200 является также физической кэш-памятью — в противоположность логической кэш-памяти, которую реализуют некоторые пользователи RISC-микропроцессоров. Физическая кэш-память отличается от логической тем, что ее не приходится полностью очищать при переключениях и задачи на задачу, как логическую.

УУП осуществляет преобразование адресов, причем это может делаться одновременно с поиском данных в кэш-памяти. Часть логического адреса передается в кэш-память, когда полный адрес поступает в УУП. Если имеет место попадание для кэш-памяти (искомые данные находятся здесь), кэш-память выдает всех четырех «кандидатов» из четырехмодульной ассоциации, однако, поскольку использовалась только часть логического адреса, пока еще не известно, какое из этих четырех слов запрашивается. В этот момент преобразованный физический адрес из УУП также оказывается готовым, так как он вычислялся параллельно. Теперь, поскольку все четыре слова кэш-памяти найдены и представлены одновременно, нужное слово можно быстро выбрать.

Еще один параллельный процесс — это текущее управление когерентностью кэш-памяти. На каждом кристалле 88200 размещается специализированный процессор, так называемый контроллер шины памяти, который следит за когерентностью кэш-памяти. Этот контроллер непрерывно наблюдает за работой шины памяти, за тем, какие изменения производятся в

КАКИМ ОБРАЗОМ ФИРМЕ MOTOROLA УДАЛОСЬ РАЗРАБОТАТЬ И ИЗГОТОВИТЬ СВОИ RISC-КРИСТАЛЛЫ ВСЕГО ЗА ДВАДЦАТЬ МЕСЯЦЕВ

Микросхема 88100 фирмы Motorola была спроектирована и воспроизведена в кремнии всего лишь за двадцать месяцев. Это выдающееся достижение — если учесть, что 88100 представляет собой RISC-микропроцессор с встроеным устройством для выполнения операций с плавающей точкой и содержит 180 тыс. транзисторов. Однако еще более впечатляет то, что в течение этого же периода времени фирма Motorola разработала также взаимодействующий с этим микропроцессором кристалл 88200, реализующий функции кэш-памяти и устройства управления памятью и содержащий 750 тыс. транзисторов — и затратила на это всего одиннадцать месяцев. Ранее на проектирование и изготовление одного, причем гораздо более простого микропроцессора приходилось затрачивать от трех до пяти лет.

Фирме Motorola удалось добиться такого успеха благодаря тому, что ее разработчики пользовались методологией и средствами автоматизированного кремниевого проектирования — конкретнее, инструментальной системой проектирования и генерации GDT компании по кремниевым компиляторам Silicon Compiler Systems Corp. (Сан-Хосе, шт. Калифорния).

В состав инструментальной системы GDT входит процессор-имитатор, который позволил фирме Motorola оптимизировать набор команд процессора 88100 применительно к программам на языке Си. Этот набор команд содержит те команды, которые чаще всего используются в компиляторе языка Си. Подобная оптимизация явилась одним из способов, при помощи которых достигнуто высокое быстродействие кристалла — 17 млн. команд/с. В систему GDT входят также выходные процедурные инструментальные средства автоматического топологического проектирования — сами кремниевые компиляторы. Это дает возможность разработчику менять технологию кристалла с целью достижения максимально возможного быстродействия и максимально возможного использования площади кристалла — вплоть до момента, когда результаты проектирования передаются на изготовление реального кремния.

На самом раннем этапе процесса проектирования разработчики из фирмы Motorola провели модификацию выполнения команд при помощи многорежимного имитатора под названием Lsim, входящего в состав инструментальной системы GDT. Фактически они промоделировали в самом начале проектирования работу регистров и потоки данных между регистрами при выполнении различных команд.

Один из ключевых вопросов проектирования набора команд процессора 88000 заключался в том, чтобы добиться минимизации времени, необходимого для выполнения вызова подпрограммы, который весьма активно используется в компиляторах. Передачу управления на подпрограмму и выполнение контекстного переключения нужно делать как можно быстрее.

ячейках основной памяти и во всех кэш-памяти, гарантирует когерентность своей собственной кэш-памяти — текущие правильные слова сохраняются, а устаревшие и недействительные значения вычищаются.

Весь набор кристаллов рассчитан на параллельную работу — фирма Motorola заявляет, что одновременно могут выполняться одиннадцать операций. Как правило, подсистема кэш-памяти будет осуществлять управление когерентностью,

Группа разработчиков решила данную проблему путем использования так называемых регистров-табло (полного набора регистров центрального процессора) для каждой подпрограммы. Это означает, что при переключении компьютера с задачи на задачу перезагрузка регистров не производится — процессор просто перестает использовать один набор регистров и начинает использовать другой, причем это происходит за один такт.

После того как схема процессора была полностью промоделирована, ее передали для обработки при помощи инструментальных средств процедурного топологического проектирования. Фирма Motorola предоставила компании Silicon Compiler функциональную модель элементов статического ЗУПВ для кристалла 88200. Эти элементы создали разработчики статических ЗУПВ фирмы Motorola. Фирма Motorola заключила контракт с компанией Silicon Compiler на создание полного кристалла кэш-памяти и УУП. Когда пришло время строить матрицу памяти этого кристалла, группа разработчиков из компании Silicon Compiler использовала в высшей степени оптимизированный элемент памяти статического ЗУПВ, спроектированный вручную на системе топологического проектирования Calma GDS-II. Затем топология этого элемента была преобразована в описание на языке Эль (L), который служит для представления всех компонентов в среде системы GDT. После этого для создания матрицы памяти статического ЗУПВ емкостью 16 кбайт (с организацией 16К слов по 8 бит) разработчики из компании Silicon Compiler просто указали размер матрицы, а остальное сделал компилятор.

Одной из наиболее важных особенностей подобного подхода является то, что кремниевая компиляция позволяет разработчику вносить изменения в схему практически до последнего момента процесса проектирования. Если говорить о кристалле 88200, то за три недели до срока, когда компания Silicon Compiler должна была выдать готовые фотошаблоны кристалла, фирма Motorola попросила группу разработчиков добавить еще один бит в матрицу памяти. «Мы оказались в состоянии добавить этот бит и связанную с ним логику, провести повторную компиляцию всей топологии и ни на один день не сорвать срок поставки», — говорит Хэл Аллес, вице-президент по проектированию в компании Silicon Compiler.

Другим примером легкости внесения изменений благодаря компилятору может служить проектирование ассоциативной памяти кристалла 88200. Разработчики из компании Silicon Compiler не знали точно, сколько места удастся оставить на поверхности кристалла после проектирования всех его остальных блоков, однако в любом случае они хотели заполнить его буфером ассоциативной памяти максимально возможной емкости.

«После завершения основного этапа проектирования, — говорит Аллес, — мы измерили на практически уже готовом кристалле площадь, где можно было бы разместить этот блок. Здесь помещалось 56 слов, поэтому мы скомпилировали блок именно такого размера и вставили его в имеющееся место».

Джона Маклауд

проверять наличие и отсутствие нужных слоев в кэш-памяти и производить преобразование адресов. В то же самое время блок данных и блок команд, размещаемые на кристалле процессора, будут взаимодействовать с регистровым блоком, целочисленные устройства будут выполнять свои операции и устройство с плавающей точкой — две операции.

Высокая степень параллелизма обеспечивает две возможности, которые, по словам предста-

МАЛЫЙ ШАГ РАСПОЛОЖЕНИЯ ВЫВОДОВ МИКРОСХЕМ — КЛЮЧ К СОЗДАНИЮ ФУНКЦИОНАЛЬНО НАСЫЩЕННОГО ГИПЕРМОДУЛЯ ФИРМЫ MOTOROLA

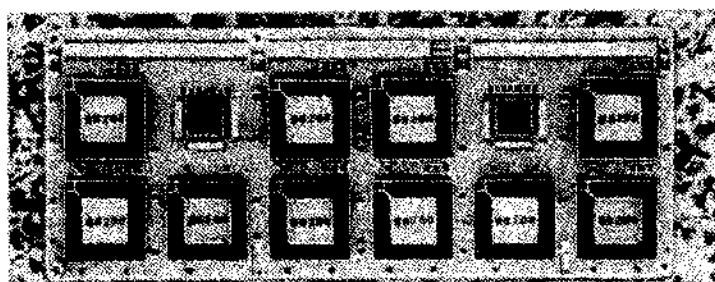
Если на печатной плате разместить до четырех RISC-процессоров, каждый из которых содержит блоки для выполнения операций с плавающей точкой и целочисленных, и восемь кристаллов кэш-памяти/устройств управления памятью (УУП) плюс три 100-контактных миниатюрных соединителя, то получится очень компактный размером $215 \times 86 \times 11$ мм модуль очень высокой вычислительной мощности для построения систем. Инженеры микрокомпьютерного отделения фирмы Motorola в Темпе, шт. Аризона, решили, что для набора кристаллов 88000 их смежного микропроцессорного объединения такая компактная компоновка необходима во многих различных приложениях. Поэтому разработчики из микрокомпьютерного отделения создали семейство так называемых гипермодулей, содержащих процессоры 88100 и кэш-памяти/УУП 88200 в различных сочетаниях и конфигурациях.

Для этой разработки потребовались как освоение новой конструкции корпуса, так и координированные усилия нескольких отделений фирмы Motorola. В обычном случае процессор и кэш-память/УУП конструктивно оформлялись в корпусах с матрицей штырьковых выводов, причем корпус имел размер 43 мм на сторону, а выводы располагались с шагом 2,54 мм. Этот корпус был слишком велик для запланированного модуля, поэтому пришлось создать совершенно новый по конструкции корпус.

Под общим руководством отделения компьютерных устройств объединение средств сотовой связи фирмы Motorola разработало оригинальный керамический корпус с матрицей контактных площадок (многослойную структуру, линии ввода-вывода которой выходят на матрицу контактных площадок, находящихся в нижнем слое); этот квадратный корпус имеет габариты около 28×28 мм и 288 контактных площадок, расположенных с шагом около 1,5 мм.

Из 288 контактных площадок 186 служат для сигнальных соединений, разводки питания и земли. Остальные 102 площадки предназначены для соединения со сквозными теплоотводящими столбиками материнской платы. Корпуса с матрицами контактных площадок впервые предложила компания Honeywell Inc. для кристаллов, разрабатываемых по программе создания сверхскоростных интегральных схем (ССИС) министерства обороны США; фирма Motorola является, по-видимому, первой, кто использует эти корпуса для коммерческих ИС.

Для корпусов с матрицей контактных площадок требуется специальная подложка. Здесь используется 10-слойная плата, причем ее слои питания и земли состоят из сердечников со структурой «медь — инвар — медь». Эти сердечники составной структуры служат двум целям: они



Гипермодуль, новый базовый блок фирмы Motorola, в одном из вариантов содержит два RISC-процессора 88100 и восемь кристаллов кэш-памяти/УУП 88200.

выравнивают коэффициенты температурного расширения модулей и керамических корпусов во избежание разрушения паяных соединений при изменениях температуры и обеспечивают отвод тепла, выделяемого набором кристаллов модуля. Сквозные столбики теплоотвода, соединяющиеся с контактными площадками теплоотвода описываемых матричных корпусов, позволяют каждому кристаллу иметь размерное охлаждение.

Модуль обычно крепится к материнской плате при помощи шести винтов. Электрическая связь между модулем, материнской платой и другими устройствами осуществляется при помощи трех миниатюрных соединителей.

К производству гипермодулей фирма Motorola привлекла много своих отделений. Полупроводниковое объединение фирмы Motorola будет монтировать кристаллы в новых корпусах-носителях, а ее отделение по выпуску устройств индивидуального вызова будет собирать готовые модули. Отделение микрокомпьютерных устройств будет курировать все операции по тестированию и интеграции готовых модулей.

Летом 1988 г. фирма Motorola планирует изготовить простой вариант гипермодуля с одним процессором и двумя кристаллами кэш-памяти/УУП в стандартных корпусах с матрицей штырьковых выводов, смонтированных на специальной демонстрационной печатной схемной плате соответствующего размера. Этот модуль под наименованием HM88K-1P32 будет стоить 1400 долл. при поставках партиями по 100 шт. В III квартале появятся опытные образцы модуля с кристаллами, конструктивно оформленными в корпусах с матрицей контактных площадок. А в IV квартале будут готовы для эксплуатационных испытаний гипермодули в полном задуманном варианте. Серийное производство гипермодулей начнется в I квартале 1989 г.

Джерри Лаймен

вителей фирмы Motorola, не дает ни один другой RISC-микропроцессор. Архитектура семейства 88000 в принципе ориентирована на многопроцессорную и отказоустойчивую работу. Микрокомпьютерное объединение фирмы Motorola в Темпе, шт. Аризона, для реализации этих многопроцессорных и отказоустойчивых возможностей размещает кристаллы в корпусах, меньших, чем стандартные корпуса с матричным расположением штырьковых выводов, изготавливая так называемые гипермодули — с несколькими комбинациями процессорных кристаллов и кристаллов кэш-памяти (см. «Малый шаг расположения выводов микросхем — ключ к созда-

нию функционально насыщенного гипермодуля фирмы Motorola»).

Кристаллы объединения микропроцессорных изделий в Остине, шт. Техас, монтируются в 180-контактных керамических корпусах с матрицей штырьковых выводов размером около 43 мм на сторону. В то же время кристаллы для гипермодуля конструктивно оформляются в 28-мм корпусах с матрицей контактных площадок.

Сейчас фирма Motorola наращивает объем производства первых 20-МГц кристаллов 88000, планируя начать серийные поставки к концу 1988 г. А заказчики начнут изготавливать системы в I квартале 1989 г. Группа разработчи-

ков собирается к концу 1988 г. подготовить производство 25-МГц вариантов кристаллов — сейчас она начинает изготавливать опытные партии для предварительных заводских испытаний. Цена 20-МГц процессора 88100 и кэш-памяти/УУП 88200 составят 495 и 795 долл. соот-

ветственно. Фирма Motorola начала разрабатывать в сотрудничестве с корпорацией Data General ЭСЛ-варианты своих кристаллов и сообщает, что в перспективе она собирается перейти и на арсенид галлия.