

Предпосылки к созданию однокристалльного многопроцессорного компьютера ПС-2000М производительностью 1-10 TFlops

С.Е. Артамонов², Ю.С. Затуливетер¹, Е.А. Фищенко¹

Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН¹, Общество с ограниченной ответственностью «ИДМ»²

Показано, что отсутствие высокоэффективных многопроцессорных архитектур становится ключевой проблемой развития высокопроизводительной элементной базы. Рассматривается однокристалльная масштабируемая архитектура, которая развивает отечественную линию многопроцессорных компьютеров ПС-2000, впервые в мире выпущенных большой серией и промышленно апробированных на широких классах задач с массовым параллелизмом. Предлагается концепция реализации однокристалльного многопроцессорного компьютера ПС-2000М с масштабируемой архитектурой производительностью 1-10Tflops. Приводится сравнение ее архитектуры с архитектурами GP GPU, таких как nVIDIA Fermi и AMD Radeon, а также с архитектурами гетерогенных мультипроцессоров Intel Larrabee и IST Cell.

1. Введение

Технологии отечественного производства компьютерной элементной базы отстают от мирового уровня на несколько поколений. Наличие своей конкурентоспособной элементной базы необходимо для возрождения отечественного компьютеростроения, без которого инновационное развитие и модернизация экономики страны невозможно. Снижение зависимости от зарубежной элементной базы – еще и первоочередное требование национальной безопасности.

Современная индустрия интегральных схем в нормах 65, 45, 32 нм с уменьшением размера транзисторов дает, как и ранее, квадратичный рост плотности их размещения на кристалле. Чипы с 1-2 млрд. транзисторов и более перестали быть уникальными и серийно выпускаются разными производителями. Вместе с тем, в сферах массового производства элементной базы впервые за весь микропроцессорный период возникли серьезные барьерные проблемы фундаментального характера. Без их решения прежние темпы экспоненциального роста производительности массовых компьютерных устройств становятся недостижимыми, а это для компьютерного рынка весьма болезненно, поскольку сложившиеся за десятилетия балансы производства-потребления могут быть разрушены.

Выделим два аспекта этих проблем – технологический и архитектурный.

Технологический аспект. В диапазоне 65-32 нм и менее при увеличении плотности размещения транзисторов технологии столкнулись с опережающим ростом тепловыделения, что существенно ограничило подъем рабочих частот.

Это "вдруг" возникшее ограничение на рост частот лишает производителей микропроцессоров главного и привычного способа повышения производительности в рамках сложившихся за 3 десятилетия шаблонов одноядерных микропроцессорных архитектур. В их основе, как известно, лежит классическая модель последовательных вычислений Дж. фон Неймана, которая долго служила логическим и системообразующим стандартом универсальных вычислений, связывающих воедино индустрию массового производства компьютеров и программ. Теперь прежний темп роста частот, который позволял автоматически, в рамках привычных архитектур, увеличивать производительность всех ранее созданных программ, уже стал невозможным.

Архитектурный аспект. Быстрый (по закону Мура) рост числа транзисторов на кристалле по-прежнему сохраняется. Поэтому, в условия теплового барьера, главным способом увеличения производительности становится наращивание параллелизма компьютерных архитектур. Но и тут компьютерная индустрия "неожиданно" сталкивается еще с одной барьерной проблемой. Это структурное насыщение микропроцессорных архитектур [1], суть которого – исчерпание внутренних резервов того изначально ограниченного параллелизма, который допускается в

рамках микропроцессорных воплощений модели Дж. фон Неймана. Эффект структурного насыщения обнаружил себя [1] еще в середине 90-х, но микропроцессорная индустрия его проигнорировала, т.к. имела чисто технологические возможности коммерчески очень привлекательного наращивания производительности экспоненциальными темпами за счет рабочих частот.

Но сейчас ситуация кардинально изменилась. В диапазоне 10-50 млн. транзисторов они исчерпали свои структурные резервы параллелизма и не могут задействовать миллиарды транзисторов глубоко нанометровых технологий для эффективного наращивания производительности. "Архитектурный голод" [2] делает новые миллиарды транзисторов "безработными", а перепроизводство чего-либо на рынке – далеко не лучший способ стимулирования производителей. Одновременное исчерпание структурных резервов базовой архитектуры и технологических возможностей наращивания рабочих частот создают предпосылки фундаментального кризиса компьютерной индустрии, ставшей эталоном эффективности использования научно-технического прогресса.

"Архитектурный голод" обезоруживает передовые СБИС-технологии, которые, развиваясь по закону Мура и с опорой на микропроцессорные архитектуры, длительное время были локомотивом массовой компьютеризации. Сейчас, когда фон-неймановская монополия в массовом компьютеростроении себя исчерпала, требуются однокристалльные архитектуры с массовым параллелизмом, которые позволят в широких классах применений в полной мере раскрыть вычислительный потенциал миллиардов пока еще "лишних" транзисторов. Также потребуются и качественно новые модели индустриального программирования, способные на массовом потребительском рынке обеспечивать новые компьютеры программами в экономически оправданных количествах.

2. Структурное насыщение микропроцессорных архитектур [1]

Микропроцессоры, реализуя последовательную модель вычислений, имеют ограниченные структурные резервы параллелизма. В линейке Intel эти резервы стали активно использоваться, начиная с i286. Прежде всего, в дело пошел внутренний параллелизм арифметических операций – увеличение разрядности слов и шин (i286 и далее) и схемная реализация "тяжелых" операций (i287, i387, i486), затем (i586 и далее) – их многофункциональность (разные параллельные блоки АЛУ, вплоть до MMX). Далее, начиная с i586, в ход пошли суперскалярные резервы параллелизма управляющих действий (конвейеризация и динамическое распараллеливание потока команд в ограниченном окне, предсказание условий). В поколениях после i586 удельная производительность (на транзистор), падала (рис.1).

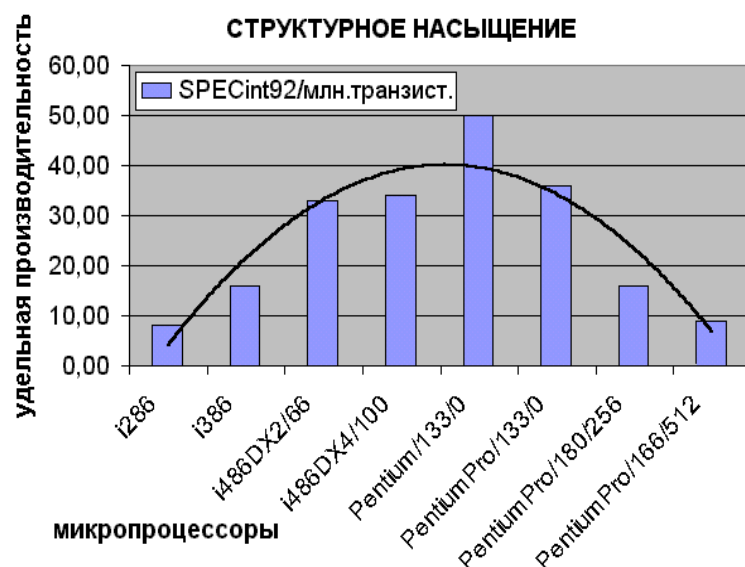


Рис.1 Удельная производительность микропроцессоров в расчете на транзистор

На последних стадиях истощение резервов завершилось обильным ростом кэш-памяти, которая "поглощала" все "излишки" транзисторов (в диапазоне 30-100млн.), сводя на нет их удельную производительность.

В конце 90-х годов со стороны уже было ясно видно, что структурные резервы параллелизма микропроцессорных архитектур почти полностью задействованы, но компьютерная индустрия в технологиях с нормами 130 и 90нм (200-700 млн. транзисторов) сконцентрировалась на резервах роста рабочих частот в диапазоне 0.7-3 ГГц. Лишние, с чисто вычислительной точки зрения, транзисторы до середины 2000-х легко укрывались в кэш памяти всех уровней.

На переходе от 90 нм к 65 нм и менее (от 0.7 к 1 млрд. и более транзисторов) тепловой барьер остановил рост частот. Массовые тиражи мобильных устройств вывели экономию энергопотребления на высшие приоритеты. В диапазоне 65 – 32 нм и менее увеличение производительности массовых компьютерных устройств за счет роста частоты при опережающем росте энергопотребления стало для новых поколений элементной базы неприемлемым.

Микропроцессорная индустрия с задержкой на десятилетие ответила на эффект структурного насыщения массовым выпуском двуядерных микропроцессорных кристаллов лишь под давлением двух суперпроблем – теплового барьера и "архитектурного голода".

Однако кристаллы со многими ядрами в виде универсальных микропроцессоров не дают роста производительности пропорционального числу транзисторов. На кристалле с миллиардом транзисторов, можно было бы размещать сотни микропроцессоров Pentium (3.1 млн. транзисторов). Но, как показала практика, число универсальных ядер на кристалле в большинстве случаев ограничено двумя (реже – 3 и 4), поскольку с увеличением числа ядер, изначально ориентированных на модель последовательных вычислений, производительность деградирует.

Кристаллы с несколькими универсальными ядрами не дали решения проблемы структурного насыщения.

Главным способом повышения производительности однокристалльных вычислительных устройств, отвечающих требованиям эффективного использования вычислительного потенциала транзисторов, становятся масштабируемые многопроцессорные архитектуры, способные на широких классах задач с массовым параллелизмом наращивать эффективную производительность пропорционально количеству транзисторов на кристалле.

Такие архитектуры выходят за рамки системообразующих полномочий модели фон Неймана и наработанных способов промышленного программирования, что ставит компьютерную индустрию в сложное положение. Пройгнорировав ранние признаки структурного насыщения, она поставила себя перед стрессовой необходимостью "на ходу" искать решение сложнейших задач не только поиска высокоэффективных многопроцессорных структур массовых применений, пригодных для СБИС-погружения, но и решения фундаментальных проблем разработки методов и средств их промышленного программирования, обеспечивающих свойство переносимости и кардинальное снижение трудоемкости.

3. СБИС-погружение многопроцессорных архитектур

Первые шаги в этом направлении были предприняты в рамках проекта развития отечественной архитектурной линии высокопроизводительных компьютеров ПС-2000 [2,3] еще в конце 80-х - начале 90-х годов [4,5]. Цель проекта – разработка на базе масштабируемой архитектуры ПС-2000 элементной базы в виде многопроцессорных СБИС. В основе проекта лежал уникальный опыт разработки и научного обоснования оригинальной архитектуры ПС-2000, инженерно-конструкторского проектирования ВК ПС-2000, организации их промышленного выпуска большой серией, а также программирования и широкого применения в разнообразных сферах. Логика обобщения этого опыта с учетом прогресса СБИС-технологий приводила к необходимости разработки новых поколений вычислительной элементной базы с масштабируемой многопроцессорной архитектурой широкого профиля, предназначенной для СБИС-погружения.

Оригинальная многопроцессорная архитектура ПС-2000 изначально разрабатывалась под широкие классы задач с массовым параллелизмом и балансировалась по экономическому критерию максимальной производительности в расчете на единицу стоимости. Во многом благодаря удачной, опередившей свое время архитектуре, компьютеры ПС-2000 стали одной из пер-

вых в мире многопроцессорных систем с массовым параллелизмом, которые выпускалась большой промышленной серией (более 240 комплексов) и стали доступными для широкого промышленного применения в разнообразных сферах народного хозяйства [2,3]. Особое сочетание достоинств SIMD- и VLIW-архитектур позволило ВК на базе ПС-2000 на многих задачах промышленной обработки данных и в научно-технических расчетах показывать производительность близкую к пиковой (80% и выше).

Прекращение финансирования в период "реформ" 90-х не позволило довести опережающие мировой уровень архитектурные решения в части высокопроизводительной элементной базы до аппаратного воплощения в виде масштабируемых многопроцессорных СБИС.

4. Однокристалльные многопроцессорные ускорители

За рубежом тема СБИС-погружения многопроцессорных вычислительных устройств на индустриальном уровне актуализировалась лишь с середины 2000-х, т.е. спустя 15 лет после упомянутого выше проекта развития линии ПС-2000. И только тогда на рынке в больших тиражах появляются самостоятельные многопроцессорные кристаллы.

Наиболее известные решения представлены следующими однокристалльными многопроцессорными архитектурами:

- графические процессорные устройства общего назначения (GP GPU):
 - nVIDIA Fermi (технология 40 нм, пиковая производительность 1Тфлопс);
 - AMD (ATI) Radeon (технология 40 нм, пиковая производительность 2,7 Тфлопс)
- гетерогенные мультипроцессоры:
 - Cell (IBM, Sony, Toshiba) (технология 90 нм, пиковая производительность 0.256 Тфлопс);
 - Intel Larrabee (технология 45нм, пиковая производительность 2 Тфлопс, на рынок не вышла).

Данные архитектурные решения дают высокую степень загрузки процессорных элементов (ПЭ) в основном для узких классов задач. В таблице 1 приведены примеры задач, решаемых на GP GPU nVIDIA. Представлено ускорение (g) относительно времени решения задачи на универсальном многоядерном CPU. Соотношение пиковых производительностей GP GPU и CPU приблизительно 200 раз. Отсюда КПД (процент от пиковой производительности): $КПД \sim (g * 100\%) / 200$.

Таблица 1. Эффективность решения различных классов задач на GP GPU nVIDIA

Примеры задач, решаемых на GPGPU nVIDIA	Ускорение, g	~КПД, %
Гидрогазодинамика	10	5
Обработка изображений , кодирование видео, компьютерное зрение	3 - 160	1.5- 80
Сейсмическое моделирование (поиск нефти/газа)	30	15
Квантовая химия, моделирование белка	20-80	10-40
Моделирование взаимодействия объектов на молекулярном уровне	17	8.5
Базы данных, поиск, сортировка	2-6	1-3
Предсказание погоды, моделирование климата	20-40	10-20
Анализ и распознавание объектов, слежение за объектами	7-12	~5
Криптография и криптоанализ	1.7-20	1-10

Из таблицы 1 видно, что максимальное КПД=80% достигается на задачах обработки изображений, для которых GPU и разрабатывался. Изначально архитектура GPU ориентирована на обработку графики, что ограничивает возможности её высокоэффективного (по степени загрузки процессорных элементов) применения в других сферах. Такая узкопрофильность свидетельствует о наличии большого резерва в совершенствовании архитектурных решений в области высокопроизводительных вычислений общего назначения. Кроме того, она существенным образом ограничивает сферы потребления и не позволяет в полной мере раскрывать потенциальные возможности новейших СБИС-технологий.

Разработка компьютеров с гибкими, эффективными на широких классах задач высокопараллельными архитектурами, ориентированных на СБИС-погружение – одна из наиболее актуальных из нерешенных задач современного компьютеростроения.

Для дальнейшего продвижения требуются новые подходы, по крайней мере, в трех направ-

лениях:

- разработка и однокристальное воплощение многопроцессорных архитектур с массовым параллелизмом, обеспечивающих на широких классах задач производительность близкую к пиковой (свыше 80%);
- разработка новых подходов к программированию параллельных вычислений, отвечающих требованиям индустриального программирования (снижение трудоемкости; повышение эффективности машинных кодов, обеспечение переносимости программ);
- существенное снижение энергопотребления в расчете на единицу реальной производительности.

В этих направлениях мы обладаем конкурентоспособным научно-техническим заделом, представленным в масштабируемой архитектуре однокристального многопроцессорного компьютера ПС-2000М.

5. Об архитектуре однокристального компьютера ПС-2000М

В основу архитектуры ПС-2000М положен успешный опыт крупносерийного индустриального производства отечественного компьютера с высокопараллельной архитектурой ПС-2000 [2, 3]. Более 240 ВК на базе ПС-2000 использовались в нашей стране во многих сферах промышленной обработки данных с рекордно высокими показателями производительности в расчете на стоимость и энергопотребление. Его структура представлена на рис.2.

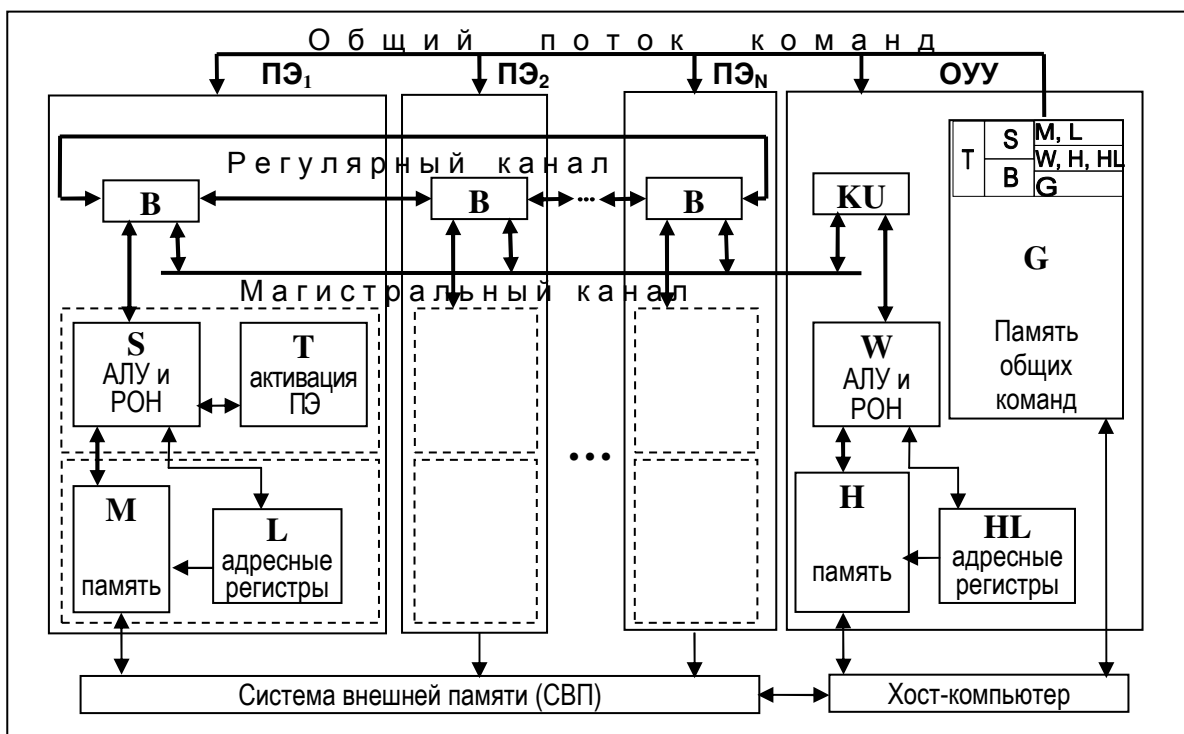


Рис.2. Структура многопроцессорного компьютера ПС-2000

Высокопараллельная многопроцессорная архитектура ПС-2000, в отличие от известных современных решений, изначально разрабатывалась и балансировалась под широкие классы задач с массовым параллелизмом. Её отличительные особенности, апробированные большой практикой:

- высокая гибкость и компактность управления (при минимальных аппаратных затратах обеспечивает эффективное сочетание разных видов машинного параллелизма);
- масштабируемость архитектуры и машинных программ;
- близкая к пиковой производительность на широких классах задач;
- высокая производительность в расчете на единицу стоимости, объема и энергопотребления.

Эти архитектурные качества, получившие дальнейшее развитие в ПС-2000М, актуальны и сейчас, поскольку до сих пор не имеют аналогов и, потому, способны составить конкуренцию известным реализациям архитектур nVIDIA, AMD, Cell.

Предварительный анализ показывает возможность реализации на технологии 65 нм однокристалльного компьютера ПС-2000М (512 ПЭ) с производительностью до 1 Тфлопс. По мере доступности более глубоких нанометровых технологий (32-12 нм) благодаря свойству масштабируемости архитектуры возможно построение программно-совместимого семейства однокристалльных компьютеров ПС-2000М с достижением на кристалле производительности 10 Тфлопс.

ПС-2000М [6,7] предназначается для создания широкой номенклатуры высокопроизводительных вычислительных систем объединяющих стандартные микропроцессоры с однокристалльной многопроцессорной системой, а именно, для создания:

- рабочих станций промышленной обработки данных (сейсморазведка, изображения, томография, криптография);
- мобильных и персональных теракомпьютеров с гибридной архитектурой (10-1000 Тфлопс);
- расширителей кластерных суперкомпьютеров (стационарных петакомпьютеров 1-1000 Пфлопс);
- встраиваемых систем реального времени: мультимедийных, телеметрических, гидроакустических, управляющих;
- систем ассоциативной обработки данных для систем управления большими базами данных и построения долговременных хранилищ данных.

В рамках проекта ПС-2000М с учетом обширного опыта промышленного программирования ПС-2000 развиваются и новые подходы к индустриальному программированию архитектур с массовым параллелизмом, позволяющие не только автоматизировать разработку ПО, но и выполнять комплексную оптимизацию по производительности и потреблению энергии.

На рис.3 изображен базовый вычислительный модуль (БВМ) [6,7], в основу которого положена SIMD-архитектура ПС-2000, см. рис.2.

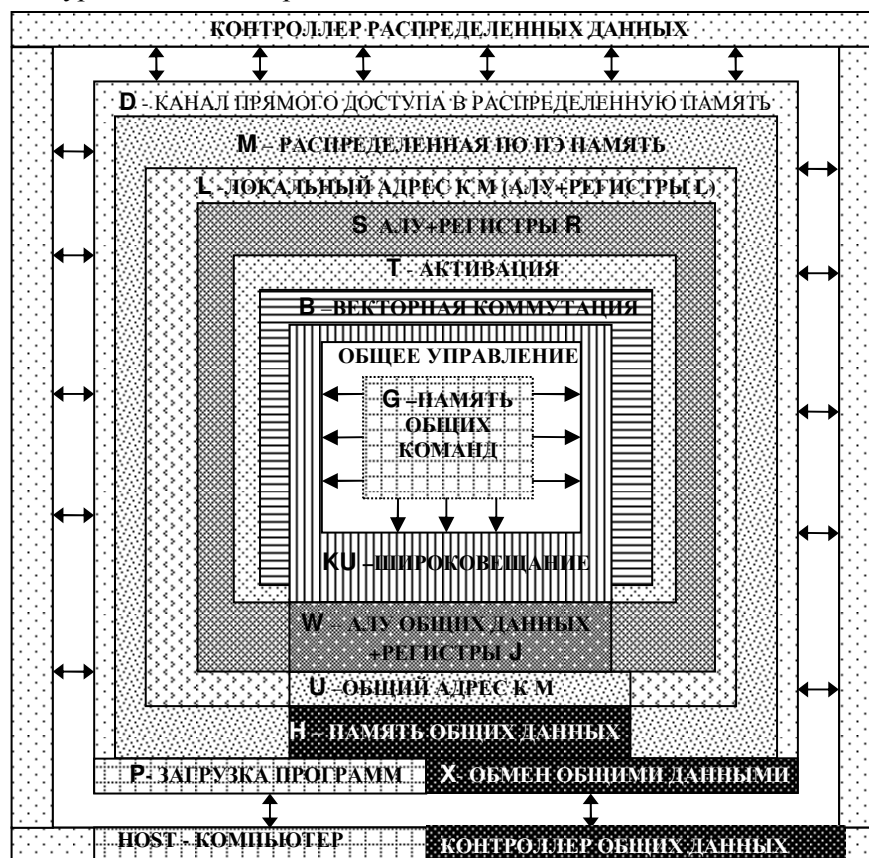


Рис.2. Структура БВМ

На рис.4 приведена Multi-SIMD – структура, которая позволяет программной реконфигурацией комплексовать БВМ внутри кристалла ПС-2000М.

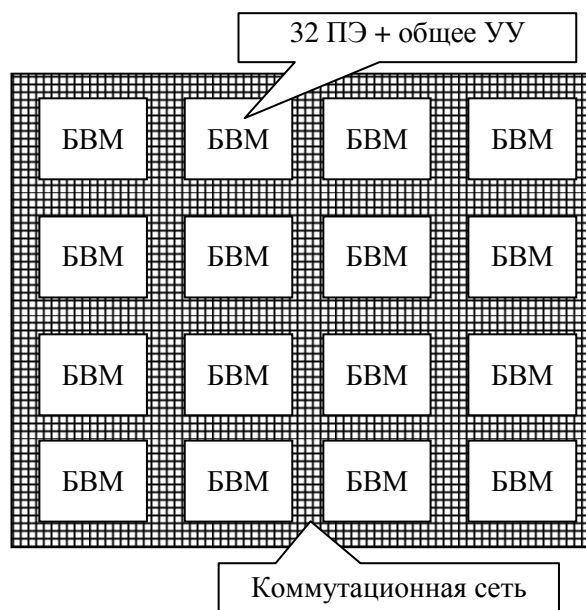


Рис.4. Multi-SIMD комплексование БВМ внутри кристалла

В статье [8] об инновациях в архитектуре nVIDIA Fermi обсуждаются также ее недостатки и важнейшие проблемы построения сбалансированных компьютерных архитектур.

К недостаткам архитектуры nVIDIA Fermi отнесены:

- относительно небольшой объем памяти GPU;
- невозможность прямого ввода/вывода в память GPU;
- отсутствие возможности «бесшовного» комплексования нескольких GPU.

ПС-2000М эти недостатки не присущи. Преимущества архитектуры состоят в следующем:

- широкие классы эффективно решаемых задач (с производительностью более 80% пиковой);
- структурная масштабируемость (по производительности, объемам памяти, пропускной способности памяти и канала ввода/вывода, энергопотреблению);
- большой объем и пропускная способность внутренней памяти;
- возможность комплексования на внутри- и межкристальном уровнях;
- наличие канала прямого доступа в распределенную память в ориентации на использования масштабируемых высокоскоростных интерфейсов – QuickPath, PCI-Express, Hypertransport.

Эти качества дают основания полагать, что архитектура ПС-2000М обладает потенциалом конкурентоспособности в классе однокристалльных компьютеров общего назначения (GP). В нем, как нам представляется, изначальная узкая специализация на графическую обработку (GPU) или игровые требования (Cell) является не только необязательной, но и излишней. Она заведомо "ущемляет" многие другие классы задач с массовым параллелизмом, для которых отсутствует необходимость в высококачественной онлайн визуализации, сопутствующей вычислениям (например, задачи ассоциативной обработки данных, распознавания, управления и др.).

Проблемы создания аппаратных средств эффективного решения различных классов задач (GP) и специальных ускорителей визуализации (GPU) можно (а, возможно, и нужно) рассматривать отдельно. Это позволит достигать предельных результатов в каждом из этих случаев, что в целом даст больший эффект, чем искусственное, не всегда оправданное, "натягивание" различных задач на вычислительные структуры, изначально предназначавшиеся под спецвычисления. Необходимость "приведения" задач к удобному для GPU виду существенно усложняет и без того непростые задачи параллельного программирования, ставит дополнительные препятствия на пути к получению высокоэффективных кодов программ машинного уровня.

6. Сравнение архитектур

В таблице 2 приведено сравнение архитектуры ПС-2000М с наиболее известными архитектурами, предназначенными для массового рынка высокопроизводительных вычислений:

- графических процессорных устройств GP GPU - nVIDIA Fermi и AMD (ATI) Radeon;
- гетерогенных мультипроцессоров - Intel Larrabee и IST Cell.

Из таблицы 2 видно:

- архитектура ПС-2000М превосходит другие архитектуры по объему внутренней памяти, которая имеет распределенную организацию, что значительно увеличивает ее пропускную способность (пропорционально количеству ПЭ) и позволяет достигать эффективную производительность на многих классах задачах близкую к пиковой;
- статическая организация вычислительного процесса дает предпосылки к его оптимизации на этапах компиляции, что существенно упрощает всю совокупность распределенных механизмов управления вычислениями, что позволяет кардинально снижать аппаратные и временные затраты на управление, а вместе с ними и тепловыделение;
- наличие канала прямого доступа в распределенную память позволяет совмещать вычисления с вводом/выводом данных, что значительно повышает эффективную производительность на реальных задачах, а также обеспечивает комплексирование на межкристалльном уровне;
- применение в распределенной памяти ПС-2000М кода Хемминга, повышает помехоустойчивость, живучесть и радиационную стойкость кристалла.

Таблица 2. Сравнение архитектур высокопроизводительных вычислителей для массового рынка

Характеристика	NVIDIA Fermi	AMD (ATI) Radeon	Intel Larrabee	IBM, Sony, Toshiba Cell	ПС-2000М
Технология, нм	40	40	45	90	65 – 12
Пиков. произв., Тфлопс	1	2,7	2	0,256	1 – 10
Число ПЭ	512√256	320×5√160×5	8√16√32√48×(x86+БВМ)	CPU+8×БВМ×2√4√8√16	512 (до 8192)
Вычисл. процесс	Динамика	Динамика	Динамика	Статика	Статика
Организация памяти	Общая	Общая	Распределенная	Распределенная	Распределенная
Объем памяти, МБ	1	0,6	8	2	16-256
КПДП	нет	нет	есть	есть	есть
Коррекц. ошибок (живучесть)	ЕСС	нет	нет	нет	код Хэмминга

Новизна архитектуры ПС-2000М по сравнению с известными на сегодня однокристалльными решениями состоит в том, что она изначально сбалансирована под широкие классы задач с массовым параллелизмом. Параллелизм (и вместе с ним пропускная способность) арифметических ресурсов и ресурсов внутренней оперативной памяти масштабируется пропорционально росту количества ПЭ (в диапазоне 512-8192 ПЭ). Достижение этих качеств стало возможным благодаря опыту разработки, серийного производства, а также индустриального программирования и широкого использования в различных сферах народного хозяйства компьютера ПС-2000, оригинальную архитектуру которого по многим качествам можно отнести к классу широкопрофильных многопроцессорных компьютеров с массовым параллелизмом общего назначения.

Заключение

Высокопроизводительная элементная база на основе ПС-2000М может быть положена в основу единой, компьютерной платформы высокопроизводительных масштабируемых семейств вычислительных систем новых классов, оснащенных индустриальными технологиями

создания совместимого программного обеспечения. Такие вычислительные системы могут составлять основу различных мобильных устройств, систем управления и обработки данных реального времени, настольных суперкомпьютеров, игровых приставок новых поколений, рабочих и серверных станций, проблемно-ориентированных вычислительных систем, дата-центров, а также общедоступных суперкомпьютеров.

Своевременная реализация предложения по созданию конкурентоспособной отечественной элементной базы будет способствовать инновационному развитию и модернизации экономики, решению задач национальной безопасности, откроет новые пути развития экспорта российской высокотехнологичной продукции.

Литература

1. Затуливетер Ю.С. Компьютерные архитектуры: неожиданные повороты // HARD'n'SOFT. Компьютерный журнал для пользователей. 1996. №2. С. 89-94. URL: http://zvt.hotbox.ru/p2_z1.htm (дата обращения: 11.02.2011).
2. Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.Ф. Компьютер ПС-2000: многопроцессорная архитектура, опередившая время // Пленарные и избранные доклады Четвертой международной конференции "Параллельные вычисления и задачи управления". М.: ИПУ РАН. 2008. С. 63 - 75.
3. Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А. Многопроцессорный компьютер ПС-2000 // Открытые системы. 2007. № 9. С.74-79. URL: <http://www.osp.ru/os/2007/09/4570286/> (дата обращения: 11.02.2011).
4. Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А., Кротов В.А., Лементуев В.А. Параллельные высокопроизводительные ЭВМ на основе заказных СБИС с многопроцессорной архитектурой // Приборы и системы управления. 1996. №12. С.24 -26.
5. Артамонов С.Е., Затуливетер Ю.С., Козлов В.А., Лементуев В.А., Фищенко Е.А. Перспективные СБИС с многопроцессорной архитектурой // Тезисы докладов Второго межведомственного научно-практического семинара "Проблемы и технологии создания и использования космических систем и комплексов на базе малых КА и орбитальных станций". М.: ГКПНЦ им. Хруничева. 1998. С.131.
6. Затуливетер Ю.С, Фищенко Е.А. Многопроцессорная архитектура ПС-2000 на кристалле СБИС // Проблемы управления. 2007. № 4. С.30-35.
7. Артамонов С.Е., Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А. Предложение по созданию однокристалльного многопроцессорного компьютера ПС-2000М // Материалы докладов Международной научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии: разработка, программирование, применение» Т.1.-Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. 2010. С. 22-26.
8. Patterson D. The Top 10 Innovations in the New NVIDIA Fermi Architecture, and the Top 3 Next Challenges, 30.09.2009 // URL: http://www.nvidia.com/content/PDF/fermi_white_papers/D.Patterson_Top10InnovationsInNVIDIAFermi.pdf (дата обращения: 11.02.2011).