

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВОЛЖСКИЙ ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА МАТЕМАТИКИ, ИНФОРМАТИКИ И
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

Группа ПМИ-201

РЕФЕРАТ

на тему:

Закон Мура и его предел

Студент _____ Остапчук А. В.
(подпись)

Преподаватель _____ Полковников А. А.
(подпись)

Волжский 2021 г.

Содержание

Введение	3
Глава 1 Закон Мура и эволюция компьютеров	4
Глава 2 Следствия закона Мура	7
Глава 3 Масштабирование интегральных схем и основные условия его проведения	10
3.1 Основные термины	10
3.2 Масштабирование интегральных схем	11
Глава 4 Предел закона Мура	16
Заключение	18
Литература	20

Введение

Компьютерная техника лежит в основе современного прогресса. Она обеспечивает работу современных станков, контроль технологических процессов на производстве, связь на всех уровнях (от межгосударственного до бытового), с помощью неё проводятся сложные и трудоёмкие расчёты, за счёт этого значительно ускоряются процессы конструирования, разработки и, в итоге, она задаёт темпы прогресса и роста человечества в науке и технологиях.

Основой современной компьютерной техники являются микропроцессоры. Увеличение их быстродействия позволяет ставить перед техникой новые задачи, такие как моделирование сложных процессов, обработка больших объёмов информации (например, наблюдение за космосом), обеспечение автономной работы устройств, машин и так далее.

Кремниевые микропроцессоры в свою очередь содержат транзисторы, которые контролируют электрический ток. Гордон Мур предсказал, что количество транзисторов в микросхеме будет увеличиваться, задав тем самым расчётный показатель прогресса технологии.

Глава 1

Закон Мура и эволюция компьютеров

При рассмотрении влияния производительности аппаратуры на программирование нельзя не учитывать ось времени. Чрезвычайные успехи информационных технологий идут рука об руку с прогрессом в разработке аппаратуры. В 1965 году появилась статья Гордона Э. Мура (Gordon Moore) (рис. 1.1), сооснователя корпорации Intel, в которой он в чрезвычайно яркой форме описал этот феномен.

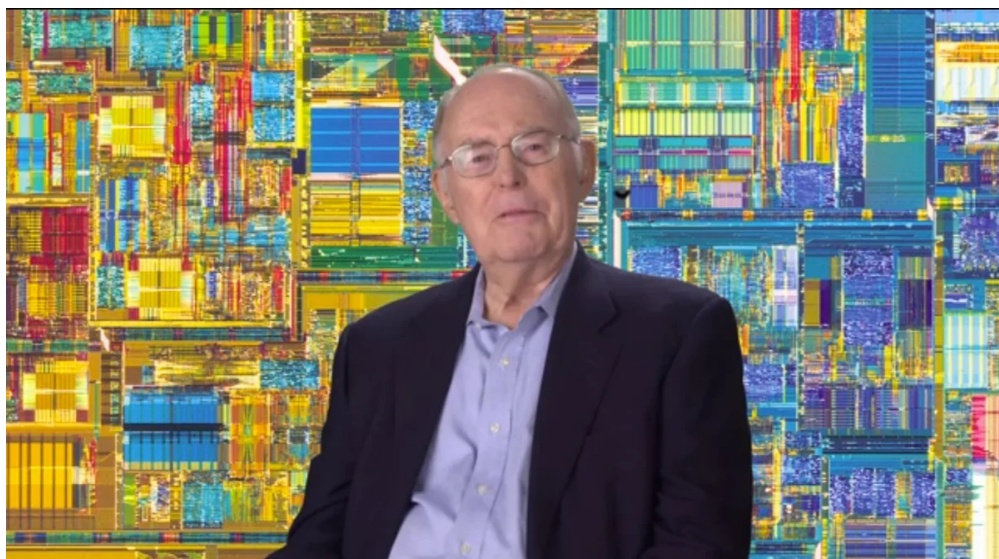


Рис. 1.1. Гордон Эрл Мур

Наибольшую известность получил так называемый «закон Мура», формулируемый следующим образом: *«Число компонентов, размещаемых на интегральной схеме при сохранении постоянной стоимости, удваивается каждые 18 месяцев»* (заметим, что сам Мур говорил о двух годах, но потом эта константа была уменьшена по результатам наблюдений до полутора лет). Есть несколько вариантов этого закона, но все они говорят об экспоненциальном росте. Эти утверждения не являются в полном смысле этого слова «законами», такими, как законы, открытые Максвеллом, Ньютоном или Эйнштейном. Это наблюдения о прогрессе индустрии в течение

нескольких десятилетий — наблюдения, которые оказались пророческими и до сих пор продолжают быть применимыми. Удивительно, что нет никакой другой области человеческой деятельности, хоть сколько-либо напоминающей столь удивительную скорость роста. Автомобили сегодня не в тысячу раз быстрее, чем 20 лет назад.

В то время как закон, сформулированный Муром, говорил о плотности размещения элементов на интегральной схеме, а тем самым, и о скорости обработки, варианты этого закона говорили о том же феномене, справедливом и для многих других аспектов, — размере памяти, скорости доступа, стоимости различных устройств. Ещё немногим более десятилетия назад стоимость мегабайта дисковой памяти опустилась ниже одного доллара. Сегодня не многие готовы платить доллар за гигабайт (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Средняя стоимость 1 Гб на жёстком диске

Основной закон Мура не может быть беспредельно устойчивым, поскольку размещение все большего числа элементов в ограниченном пространстве приводит к росту излучаемого тепла, а кроме того, есть чисто физические пределы скорости распространения сигнала. В результате, как говорят некоторые компьютерные архитекторы: «число людей, объявляющих, что закон Мура перестал действовать, удваивается каждые полтора

года». Фактически, закон продолжает действовать, но на новом уровне. Решение дают параллельные вычисления. Не нужно создавать процессор, работающий ещё быстрее. Можно создать несколько процессоров, работающих параллельно. Многоядерная архитектура компьютеров становится общепризнанной. Проблема в том, что пока нет удовлетворительного решения, позволяющего программистам использовать все преимущества параллельной архитектуры.

Глава 2

Следствия закона Мура

Хотя в законе Мура говорится лишь об экспоненциальном возрастании числа транзисторов на одной микросхеме, сводить все к одному этому утверждению было бы неверно. Точнее, сам факт увеличения плотности размещения транзисторов за счёт сокращения их размеров сопровождается важными последствиями. Действительно, если говорить просто о количестве транзисторов в одной микросхеме, то со времени 30-транзисторных компонентов 1965 года это количество возросло на много порядков. В 1975 году количество компонентов достигло 65 тыс. К 1989 году процессор Intel i486 содержал 1,4 млн. транзисторов. А в 2002 году корпорация Intel анонсировала процессор Intel Pentium 4 на основе 0,13-микронной технологии, вмещающий 55 млн. транзисторов в одном кристалле.

В настоящее время в процессорах Apple A количество транзисторов с 2013 года растёт на 43% в год, так что в процессоре A13 насчитывается 8,5 млрд. транзисторов. Компания Intel перестала публиковать данные о количестве транзисторов в 2017 году. Серверные процессоры AMD Ерус второго поколения содержат 39,54 млрд. транзисторов. Скоро технология производства интегральных микросхем позволит увеличивать количество транзисторов на десятки миллиардов ежегодно (рис. 2.1).

Однако сколь впечатляющим ни был бы рост количества элементов — это только частность. Мощь и уникальность полупроводниковых компонентов состоит в том, что одновременно с увеличением количества транзисторов улучшаются почти все параметры микропроцессорной технологии, главные из которых — скорость и производительность. Так, процессор i486 работал на тактовой частоте 25 МГц. На сегодняшний день массовые процессоры AMD Ryzen 3000-й серии и Intel Coffee Lake Refresh имеют частоты по всем ядрам в районе 3,9-4,7 ГГц и постепенно подбираются к 5 ГГц при нагрузке на все ядра.

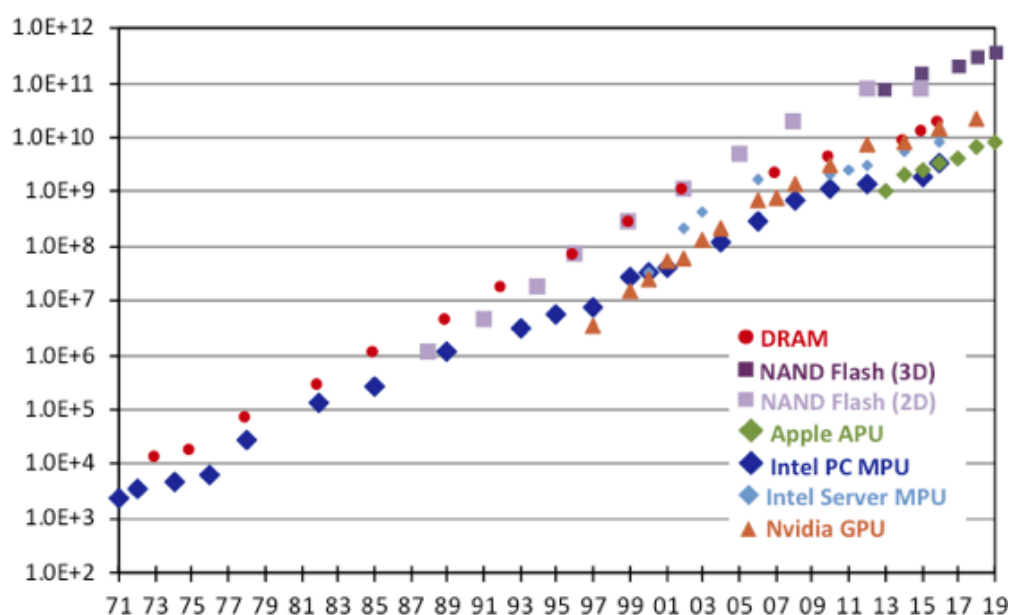


Рис. 2.1. Динамика роста количества транзисторов в различных микросхемах

Посмотрим на этот вопрос с другой стороны: в начале 1990-х годов для того, чтобы увеличить тактовую частоту i486 с 25 МГц до 50 МГц, понадобилось три года. Сегодня разработчики Intel наращивают тактовую частоту со скоростью 25 МГц в неделю. Главный директор Intel по технологиям Патрик Гелсингер заявил, что уже через несколько лет Intel планирует наращивать частоту процессоров со скоростью 25 МГц в день. Среди других характеристик, которые улучшаются благодаря закону Мура, — уровень интеграции, размеры, функциональные возможности, эффективность энергопотребления и надёжность.

Ещё одним немаловажным следствием закона Мура являются экспоненциальное падение цен в расчёте на один транзистор и соответственно непрерывный рост покупательной способности.

Когда Гордон Мур впервые сформулировал свой закон, себестоимость одного транзистора составляла около 5 \$. Сегодня за 1 \$ можно приобрести 10 млн. транзисторов. Тот факт, что это стало возможным, является прямым следствием закона Мура: быстрое снижение себестоимости приводит к экспоненциальному росту экономической эффективности (рис. 2.2).

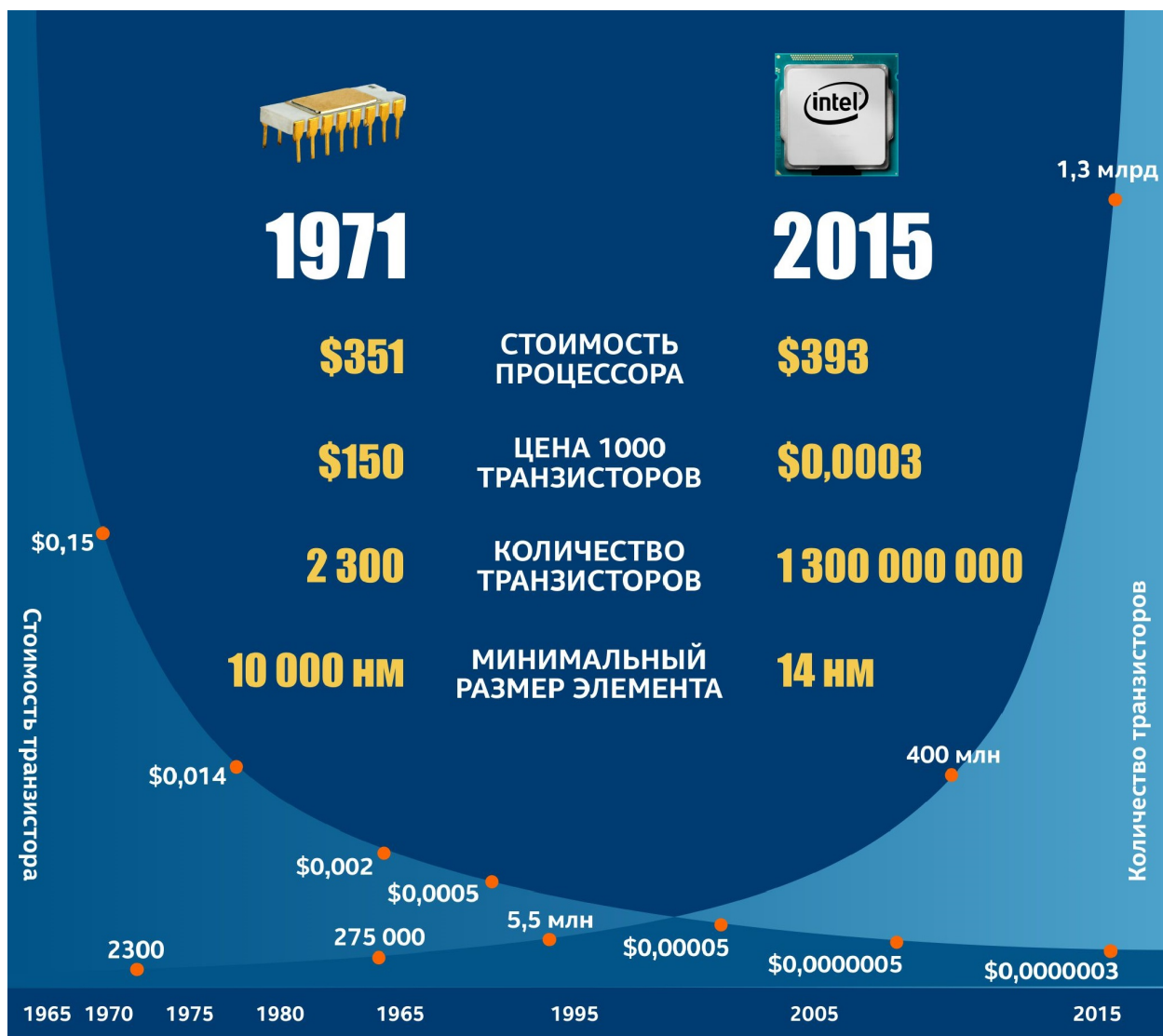


Рис. 2.2. Закон Мура в действии

Глава 3

Масштабирование интегральных схем и основные условия его проведения

3.1 Основные термины

Микроэлектроника — это раздел электроники, охватывающий исследование, разработку и применение интегральных микросхем.

Интегральная микросхема (или просто интегральная схема) — это совокупность большого количества взаимосвязанных компонентов (транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и т.п.), изготовленных в едином технологическом цикле на одной подложке и выполняющих определённую функцию преобразования информации.

Термин «интегральная схема» отражает факт объединения (интеграции) отдельных деталей (компонентов) в конструктивно единый прибор, а также факт усложнения выполняемых этим прибором функций по сравнению с функциями дискретных компонентов.

Классификация ИС может проводиться по различным признакам, но можно ограничиться лишь одним. По способу изготовления различают два главных вида схем: полупроводниковые и плёночные.

Полупроводниковая ИС — это микросхема, элементы которой выполнены в приповерхностном слое полупроводниковой подложки. Полупроводниковые ИС, как отмечалось ранее, составляют основу современной элементной базы электроники.

Плёночная ИС — это микросхема, элементы которой выполнены в виде разного рода плёнок, нанесённых на поверхность диэлектрической подложки. В зависимости от способа нанесения плёнок и связанной с этим толщины различают *тонкоплёночные* (толщина плёнки 1–2 мкм) и *толстоплёночные* интегральные схемы (толщина плёнок 10–20 мкм и более). Поскольку плёночные ИС, как правило, не позволяют выполнить активные

элементы, то их дополняют этими компонентами, соединяя с плёночными элементами посредством выводов. Тогда получается ИС, называемая *гибридной*.

3.2 Масштабирование интегральных схем

Чтобы оценить прогресс, попробуем найти зримые образы для сравнения процессора 4004 с современным Intel Core i9. Если уподобить частоту 4004, равную 740 КГц, скорости пешехода, то тогда нынешняя 5,3 ГГц окажется примерно 100 тыс. км/ч, что в 2,5 раза выше второй космической скорости, достаточной для выхода с орбиты вокруг Земли. Пятьдесят лет назад ширина проводников 4004 составляла 10 микрон (то есть их можно было рассмотреть через обычную лупу), а в нынешних процессорах она равна 14 нанометрам, эти два показателя соотносятся как длина супертанкера и один шаг пешехода. Но ещё больше впечатляет сравнение по числу транзисторов: 2300 и порядка 10 миллиардов — то есть вначале оно было равно населению райцентра, а сегодня это в 1,5 раза больше населения земного шара. И наконец, число контактов на разъёме — оно возросло с 16 до 1440. Такого беспрецедентного количественного роста технических параметров не знала ни одна отрасль.

Все эти ускорения и уменьшения стали возможны за счёт явления, получившего название «масштабирование», которое придаёт компьютерным технологиям уникальные качества, отличающие их от всех остальных, позволяя варьировать показатели в самых широких диапазонах, причём не в разы, как бывает в авиации или машиностроении, а на порядки. Можно говорить о двух уровнях масштабирования — микро и макро. Микроуровень, или миниатюризацию полупроводников, обычно связывают с законом Мура, а точнее, следует говорить о масштабировании по Деннард (MOSFET scaling by R. Dennard), а макроуровень — это наращивание мощности систем.

Масштабирование на макроуровне возможно *по вертикали* (scale up) и *по горизонтали* (scale out), последнее получило распространение вместе с появлением кластеров и других систем, состоящих из множества однород-

ных узлов. Массовое внедрение компактных серверов (в том числе, блейд-серверов) в сочетании с кластерными решениями открыло возможность для создания гигантских конфигураций, и начался процесс, охваченный положительной обратной связью: большие системы позволяют работать с большими объёмами данных, а почувствовав вкус, потребители требуют создания ещё больших систем и т.д.

Необходимость в макромасштабировании связана со следующими факторами:

- рост нагрузок — система должна справляться с постоянным увеличением числа пользователей;
- рост объёма данных — система должна справляться с неуклонным накоплением данных;
- рост производительности — система должна без серьёзной перестройки допускать наращивание производительности.

В системах с вертикальным масштабированием наращивание происходит органично, и до появления альтернативного подхода о возникающих сложностях не задумывались — достаточно было увеличивать мощность процессора, размер памяти и систем хранения, скорость обмена по каналам. Если же ядер много, то возникает проблема *декомпозиции* (partitioning) по узлам: можно, например, делить их по функциональному принципу — поделить одну задачу на некоторое количество подзадач, работающих на общий массив данных, но связанность по данным является ограничением по масштабированию. Разумнее добавить к *функциональной декомпозиции* ещё и *декомпозицию данных*. Множество современных проблем в ИТ — например, то, что наблюдается сегодня в СУБД, — объясняется необходимостью перехода от вертикального масштабирования к горизонтальному.

Теперь обратимся к микроуровню. Хорошо известно, что статья с описанием тенденции удвоения плотности транзисторов на кремниевой подложке была опубликована Гордоном Муром в 1965 году, а чуть позже изобретатель метода проектирования электронных микросхем профессор Калифорнийского технологического института Карвер Мид назвал эту тенденцию

законом Мура. Менее известно, что существует объясняющая закон Мура **теория масштабирования** (Dennard's Scaling Theory), разработанная в 1974 году Робертом Деннардом и его коллегами по IBM. Сам Деннард, несмотря на свои достижения, никогда не стремился к публичности и уже более 60 лет бесменно работает в IBM, набрав за это время на свой счёт немало изобретений и открытий, самое известное из которых было сделано им в 1968 году — это изобретение динамической памяти с произвольным доступом (Dynamic Random Access Memory, DRAM). Работая над полевыми транзисторами MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) и структурами MOS (Metal-Oxide-Semiconductor), Деннард вывел условие, необходимое для соблюдения закона Мура. Суть открытия в том, что если удерживать постоянным значение напряжённости электрического поля при уменьшении размеров транзистора, то параметры производительности улучшаются. Это значит, что если, например, сократить длину затвора в n раз и одновременно во столько же раз понизить рабочее напряжение (значение напряжённости при этом не изменится), время задержки логического элемента также уменьшится в n раз. Отсюда и жёсткая зависимость производительности от размеров элементов интегральных микросхем. Масштабирование MOSFET называют двигателем технологий больших интегральных схем (VLSI).

Теория масштабирования впервые была изложена в статье «Проектирование МОП-структур с ионной имплантацией и очень малыми физическими размерностями» (“Design of Ion-Implanted MOSFET's with Very Small Physical Dimensions”), опубликованной в 1974 году. Статья заслужила имя собственное — ее называют *Scaling Paper* (статья о масштабировании), а её появлению предшествовало десятилетие активных исследований, в результате которых биполярные точечные транзисторы со структурами обратной проводимости (n-p-n) и структурами прямой проводимости (p-n-p), изобретенные еще в 1947 году, уступили место полевым транзисторам с p-n переходом и изолированным затвором (MOSFET). Последние имели гораздо больший потенциал для миниатюризации — они стали использоваться при реализации логики и для памяти многочисленными компаниями. В те годы в IBM было решено отказаться от развития ферритовой плёночной памяти в пользу полупроводниковой, а работу в этой области возглавил

Деннард, главной задачей которого было найти такое решение, которое позволило бы закрыть разрыв по стоимости между очень дорогой памятью на магнитных сердечниках и приемлемой по цене памятью на дисках. Из-за этого разрыва компьютеры были очень несбалансированными: скажем, мини-ЭВМ PDP 11-70 имела достойную производительность, комплектовалась вполне приличными по тем временам дисками по 100–200 Мбайт, но при этом — жалкой оперативной памятью в 128 Кбайт. Даже самые первые платы полупроводниковой памяти уже имели ёмкость, измеряемую мегабайтами, что принципиально меняло условия игры — такая память была в 100–1000 раз дешевле ферритовой. Просто заменой памяти удавалось заметно повысить производительность.

В процессе исследований Деннарда удалось показать, что МОП-структуры имеют огромный потенциал для миниатюризации — при уменьшении линейных размеров можно пропорционально уменьшать подаваемое на затвор напряжение, и при этом переключающие свойства транзистора сохраняются, а скорость переключения повышается. Из этого следовало предсказание, определившее будущее технологий на несколько десятилетий, — для повышения производительности надо повышать плотность, частоту и снижать энергопотребление. Статья о масштабировании не только объяснила закон Мура, но и расширила его — в самом законе говорится о повышении плотности, но не о производительности. Заслуга Роберта Деннарда в том, что он соотнёс масштабирование с производительностью, и если Гордон Мур задал вектор для развития полупроводниковой индустрии, то Деннард объяснил, каким именно способом следует двигаться в его направлении. С тех пор постоянно уменьшающаяся ширина (технологический фактор) проводника стала главным показателем прогресса.

Заслуги Роберта Деннарда признаны и оценены, в 2007 году вышел специальный номер журнала IEEE Solid-State Circuits Society News под общим заголовком «Влияние и последствия теории масштабирования Деннарда». В номере было опубликовано несколько статей с оценкой роли теории масштабирования и её автора в истории индустрии ИТ, и в оригинале была воспроизведена сама легендарная статья. За год до этого был напечатан специальный выпуск IEEE SSCS, посвящённый закону Мура, и таким образом была восстановлена историческая справедливость — в статье одного

из авторов подчёркивается, что наряду с законом Мура надо говорить и о законе Деннарда.

Глава 4

Предел закона Мура

В последние 40 лет мы видели, как скорость компьютеров росла экспоненциально. Мы так привыкли к этому непрерывному росту, что почти считаем его законом природы. Но есть пределы этому росту, на которые указал и сам Гордон Мур. Мы сейчас приближаемся к физическому пределу, где скорость вычислений ограничена размером атома и скоростью света.

Канонические часы Тик-так от Intel начали пропускать такты то здесь, то там. Каждый «тик» соответствует уменьшению размера транзисторов, а каждый «так» — улучшение микроархитектуры. Нынешнее поколение процессоров под названием Skylake — это «так» с 14-нанометровым технологическим процессом. Логически, следующим должен стать «тик» с 10-нанометровым техпроцессом, но Intel теперь выдаёт «циклы обновления» после каждого «так». Следующий процессор, выпущенный в 2016 году, стал обновлением Skylake, всё ещё на 14-нанометровом техпроцессе. Ожидаемый переход к 10 нм планируется только к 2022 году. Замедление часов Тик-так — это физическая необходимость, потому что мы приближаемся к лимиту, где размер транзистора составляет всего несколько атомов (размер атома кремния — 0,2 нанометра).

Другое физическое ограничение — это скорость передачи данных, которая не может превышать скорость света. Требуется несколько тактовых циклов, чтобы данные попали из одного конца CPU в другой конец. По мере того как микросхемы становятся крупнее с большим и большим количеством транзисторов, скорость начинает ограничиваться самой передачей данных на микросхеме.

Технологические ограничения — не единственная вещь, которая замедляет эволюцию процессоров. Другим фактором является ослабление рыночной конкуренции. Крупнейший конкурент Intel, компания AMD, сейчас больше внимания уделяет тому, что она называет APU (Accelerated

Processing Units), то есть процессорам меньшего размера с интегрированной графикой для мини-ПК, планшетов и других ультра-мобильных устройств. Intel теперь завладела подавляющей долей рынка процессоров для высококлассных ПК и серверов. Свирепая конкуренция между Intel и AMD, которая несколько десятилетий толкала вперёд развитие процессоров x86, практически исчезла.

Заключение

Сейчас меняется сама форма компьютерных вычислений. Архитекторам вскоре не нужно будет думать о том, что ещё предпринять, чтобы успеть за законом Мура. Сейчас постепенно внедряются новые идеи, которые позволят достичь высот, недоступных обычным компьютерным системам с традиционной архитектурой. Возможно, в скором будущем скорость вычислений будет иметь не такое и большое значение, улучшить производительность систем можно будет иначе.

Самообучающиеся системы. Сейчас многие нейросети зависят от GPU. Для них создаются системы со специализированной архитектурой. Например, корпорация Google разработала собственные чипы, которые получили название TensorFlow Units (TPUs). Они позволяют сохранять вычислительные мощности за счёт эффективности производимых вычислений. Корпорация Google использует эти чипы в своих дата-центрах, на их основе работают многие облачные сервисы компании. В результате эффективность работы систем выше, а потребление энергии — ниже.

Специализированные чипы. В обычных мобильных устройствах сейчас работают ARM-процессоры, которые являются специализированными. Эти процессоры обрабатывают информацию, поступающую с камер, оптимизируют обработку речи, в режиме реального времени работают с распознаванием лиц. Специализация во всем — вот, что ожидает электронику.

Специализированная архитектура. Да, свет клином не сошёлся на архитектуре фон Неймана, сейчас разрабатываются системы с разной архитектурой, предназначенной для выполнения разных задач. Эта тенденция не только сохраняется, но даже ускоряется.

Безопасность компьютерных систем. Киберпреступники становятся все более умелыми, при взломе некоторых систем сейчас можно получить миллионы, десятки миллионов долларов. Но в большинстве случаев взломать систему можно из-за программных или аппаратных ошибок. По-

давяющее количество приёмов, используемых взломщиками, работают на системах с архитектурой фон Неймана, но они не будут работать с другими системами.

Квантовые системы. Так называемые квантовые компьютеры — экспериментальная технология, которая, кроме всего прочего, является ещё и очень дорогой. Здесь используются криогенные элементы, плюс много всего другого, чего нет в обычных системах. Квантовые компьютеры абсолютно не похожи на привычные нам ЭВМ, и закон Мура к ним никак не применим. Тем не менее, с их помощью, как считают специалисты, можно радикально повысить производительность некоторых типов вычислений. Возможно, именно закон Мура привёл к тому, что учёные и инженеры начали искать новые способы повышения эффективности вычислений, и нашли их.

Скорее всего уже через 5-10 лет мы увидим абсолютно новые системы вычислений, речь сейчас о полупроводниковой технике. Эти системы будут опережать наши самые смелые планы и развиваться очень быстрыми темпами. Скорее всего, специалисты, стремясь обойти закон Мура, создадут новые технологии разработки чипов, которые, если бы о них нам рассказали сейчас, показались бы нам магией. Что сказали бы люди, жившие 50 лет назад, если бы им дали современный смартфон? Мало кто понял бы, как все работает. Так и в нашем случае.

Литература

- [1] Гуртов, В. А. Твердотельная электроника: учеб. пособие / В. А. Гуртов. — 2-е изд., доп. — М.: Техносфера, 2005. — 408 с.
- [2] Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов / И. П. Степаненко. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. — 488 с.
- [3] Драгунов, В. П. Основы нанoeлектроники: учеб. пособие / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. — 332 с.
- [4] Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы: учеб. для вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. — 6-е изд., стер. — СПб.: Лань, 2002. — 480 с.
- [5] Россадо, Л. Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Россадо. — М.: Высш. шк., 1991. — 352 с.
- [6] Ефимов, И. Е. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надёжность: учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов / И. Е. Ефимов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1986. — 464 с.
- [7] Зи, С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Мир, 1984. — Т. 1. — 456 с.; Т. 2. — 456 с.
- [8] Тилл, У. Интегральные схемы: материалы, приборы, изготовление / У. Тилл, Д. Лаксон. — М.: Мир, 1985. — 504 с.
- [9] Черняк, Л. Закон масштабирования Деннарда // Открытые системы. СУБД. — 2012. — №. 2. — С. 61-61.