



Сорокалетие закона Мура и интервью с его автором

19.04.2005

Алекс Карабуто, info@ferra.ru

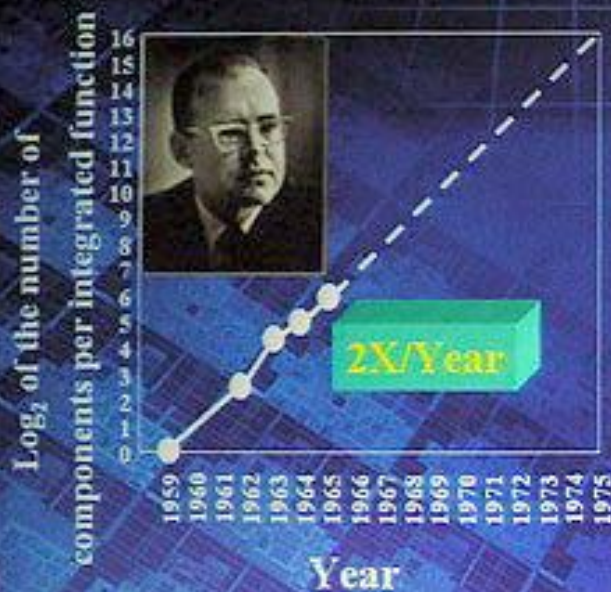
История и перспективы этого эмпирического фундамента современной полупроводниковой индустрии устами самого Гордона Мура и сотрудников Intel.

Ровно сорок лет назад, 19 апреля 1965 года, в журнале Electronics (vol. 39, N8) в рубрике «Эксперты смотрят в будущее» вышла знаменитая теперь статья Гордона Мура «[Cramming more components onto integrated circuits](#)», в которой тогдашний директор отдела разработок компании Fairchild Semiconductors и будущий со-основатель корпорации Intel



дал прогноз развития микроэлектроники на ближайшие десять лет на основании анализа шестилетнего развития младенческой тогда еще электроники, предсказав, что количество элементов на кристаллах электронных микросхем будет и далее *удваиваться каждый год*.

First Introduction of Moore's Law



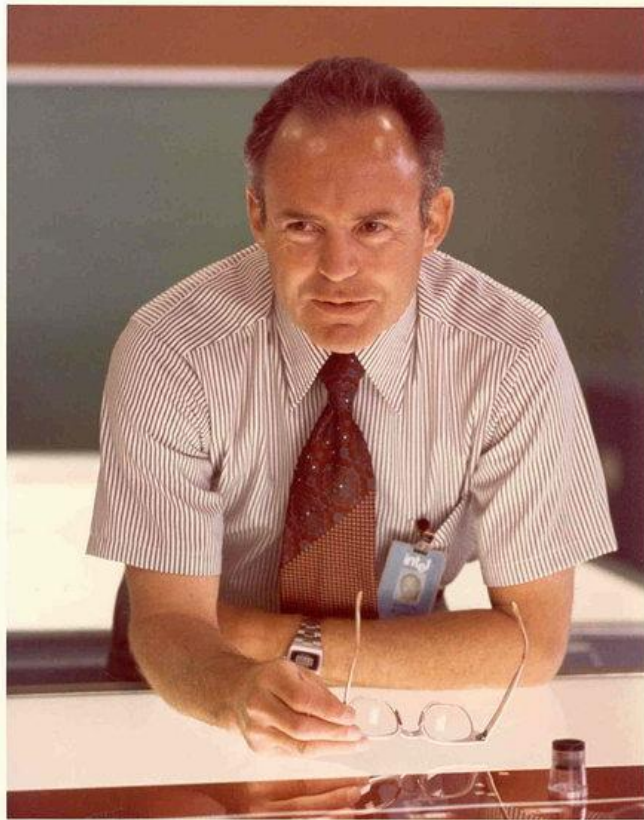
“Reduced cost is one Of the big attractions of Integrated electronics, and The cost advantage continues To increase as the technology Evolves toward the production Of larger and larger circuit Functions on a single semiconductor substrate.”

“Dr. Gordon E. Moore is one of the new breed of electronic engineers, schooled in the physical sciences rather than in electronics.”

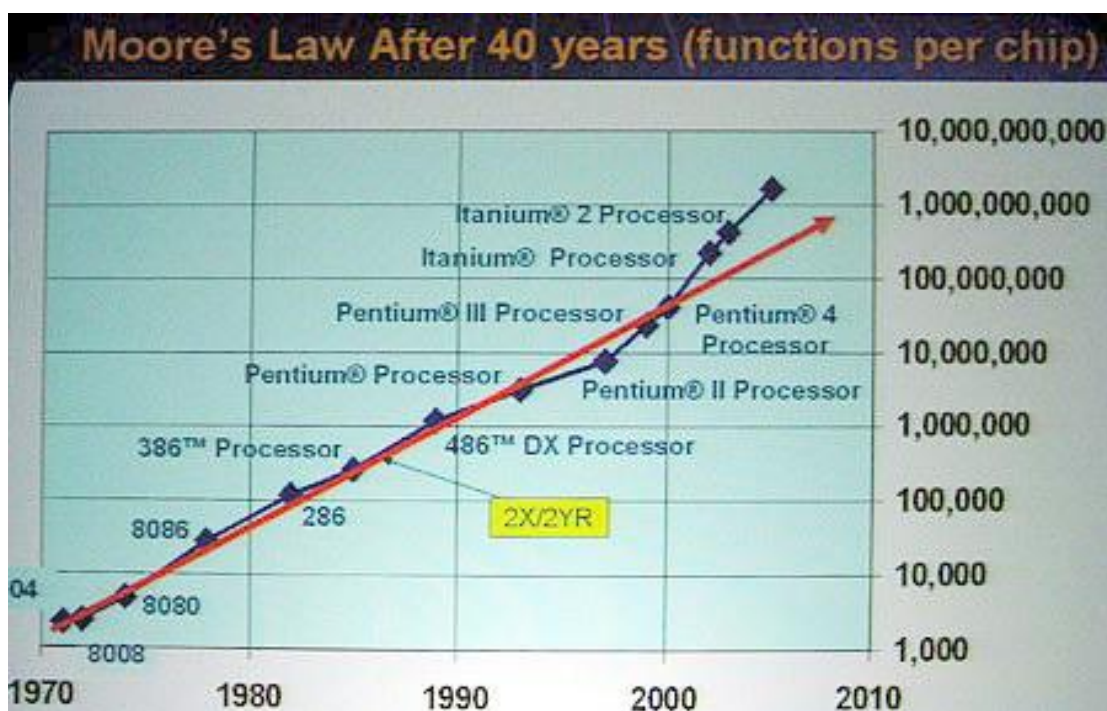
Electronics Magazine (35th anniversary), April 19, 1965

Вскоре после выхода статьи эта эмпирически подмеченная закономерность получила название закона Мура и стала, пожалуй, самым знаменитым законом в компьютерной области и полупроводниковой индустрии, задав некий фундаментальный вектор развития технологии, которому разработчики электронных чипов невольно стараются следовать вот уже сорок лет! И хотя, строго говоря, закон Мура не принадлежит к числу «научных» – физических или математических – законов, на базе которых строятся наши современные представления о природе и протекающих в ней процессах, а является просто метко подмеченным эмпирическим правилом, отражающим экспоненциальный характер развития одной из многочисленных тенденций в современном человеческом обществе (в этом смысле закон Мура – скорее «социологический», чем «компьютерный»), он оказался очень удобным для описания определённых вещей и весьма полезным для прогнозирования деятельности компаний в этой области. Именно поэтому его так полюбили многие маркетологи и директора микроэлектронных предприятий, превратив в эдакий фетиш.

Интересно, что сорок лет назад, когда было сделано предсказание Мура, микроэлектроника пребывала в самой начальной фазе своего развития. Первый транзистор был создан в 1947 году (а в 1956 году за его открытие Бардину, Браттейну и Шокли вручили Нобелевскую премию по физике). Первая микросхема заработала 12 сентября 1958 года в компании Texas Instruments (за её изобретение Нобелевскую премию по физике присудили лишь в 2000 году). «Первооткрывателями» микросхемы (то есть отцами современной микроэлектроники) по праву считаются Джек Килби и один из основателей Intel Роберт Нойс. Физики как таковой при создании микросхемы было немного, но Килби и Нойс «всего-навсего» придумали технологию, которая совершила полный переворот в электронной промышленности. Да и к 1965 году в самой сложной микросхеме компании Fairchild было всего лишь 64 транзистора, а о каких-либо достоверных статистических данных в этой отрасли не приходилось и говорить. Поэтому остаётся лишь поражаться, как в таких обстоятельствах Гордон Мур сумел предугадать фантастические темпы развития всей отрасли на несколько десятилетий вперед.



Позднее, выступая в 1975 году перед аудиторией конференции International Electron Devices Meeting (см., например, download.intel.com/.../Gordon_Moore_1975_Speech.pdf), Годрон Мур отметил, что за прошедшее десятилетие количество элементов на кристаллах действительно удваивалось каждый год, однако в будущем, когда сложность чипов возрастёт, удвоение числа транзисторов в микросхемах будет происходить несколько медленнее – *каждые два года*. Это новое предсказание также сбылось, и закон Мура продолжает в этом виде (*удвоение за два года*) действовать поныне (то есть в течение почти тридцати лет!), в последнее время немного ускорившись до *удвоения за 18 месяцев*, что можно наглядно проследить на примере деятельности лидера современной полупроводниковой индустрии корпорации Intel.

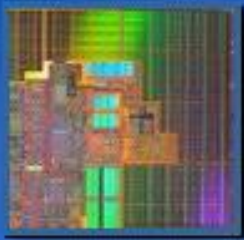


Это можно видеть и по следующей таблице.

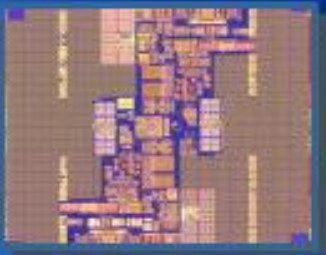
Микропроцессор	Год выпуска	Число транзисторов
4004	1971	2 300
8008	1972	2 500
8080	1974	5 000
8086	1978	29 000
286	1982	120 000
Intel 386	1985	275 000
Intel 486	1989	1 180 000
Intel Pentium	1993	3 100 000
Intel Pentium II	1997	7 500 000
Intel Pentium III	1999	24 000 000
Intel Pentium 4	2000	42 000 000
Intel Itanium	2002	220 000 000
Intel Itanium 2	2003	410 000 000
Intel Itanium (Montecito)	2005	1 720 000 000

Причём если судить по самому новому технологическому скачку (который удалось совершить Intel за последний год, подготовив двухъядерные процессоры), «запросто» удваивающему количество транзисторов на кристалле (а в случае с переходом от Madison к Montecito – так вообще учетверяющему это количество), так закон Мура возвращается, пусть и ненадолго, к своему *первоначальному* виду – удвоение числа элементов микросхем за год!

Silicon Scaling Continues to Improve Density, Performance, Power, & Cost



130 nm
Madison



90 nm
Montecito

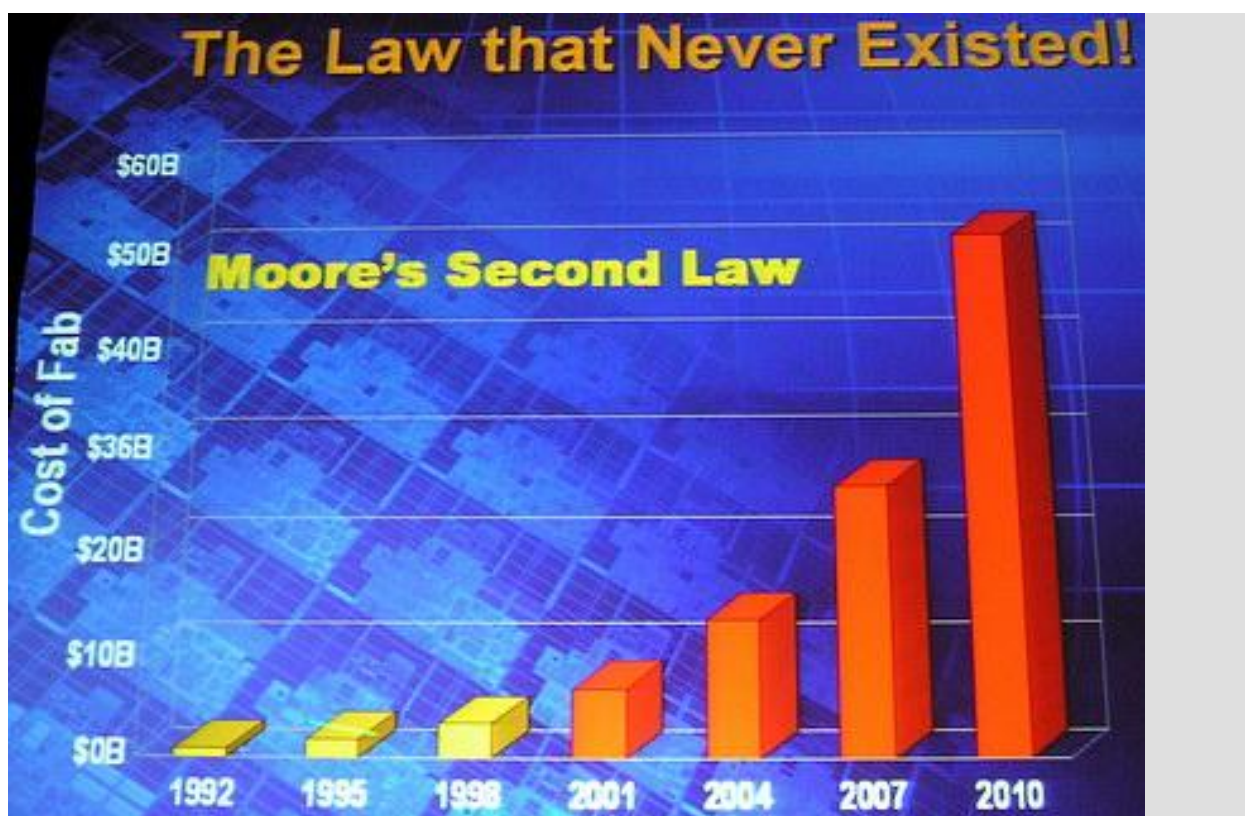
Cores/Threads	1/1	2/4
Relative Performance	1	>1.5x
Thermal Design Power	130	~100 Watt
Transistors	0.41	1.72 Billion
L3 Cache	6	24 MByte
Frequency	1.5	>1.7 GHz

Таким образом, можно даже сказать, что компания Intel за почти 40 лет своего существования (а была она основана в 1968 году при непосредственном участии Гордона Мура и Эндрю Гроува)¹ фактически *сделала* закон Мура реальностью, упорно следуя в своих планах развития и разработок этой закономерности. Особенно это стало заметно в последние годы, когда необходимость следования закону Мура стала отмечаться почти в каждой программной речи руководителей этой корпорации. Да и по поводу сорокалетия закона Мура Intel устроила пышные торжества, подготовив, например, для широкой

общественности полезную подборку информации, фото и видеоматериалов на www.intel.com/pressroom/kits/events/moores_law_40th/.

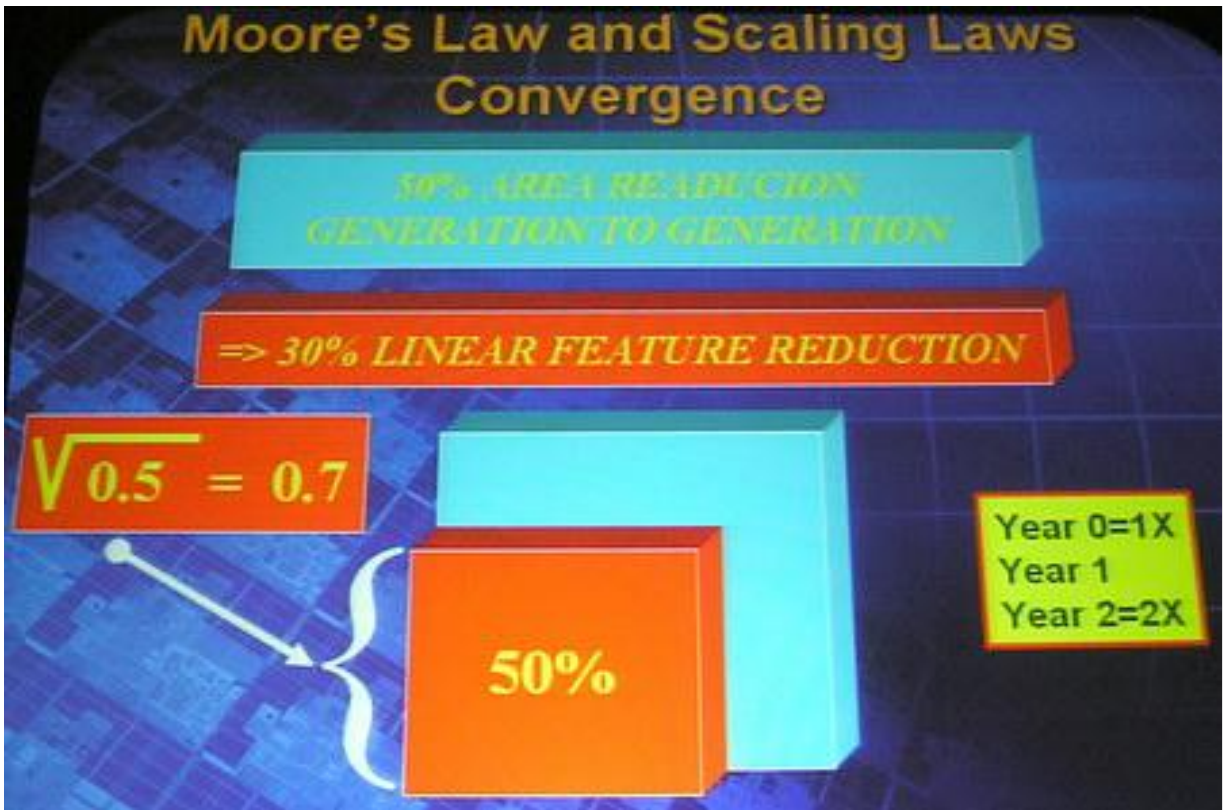
Впрочем, деятельность Intel – лишь отражение общей тенденции развития мирового рынка микроэлектроники, вычислительной техники и информационных технологий вообще, лавинообразно разрастающегося в последние десятилетия. Именно поэтому появились многочисленные «клоны» и «следствия» закона Мура, отражающие похожие тенденции экспоненциального роста в смежных областях информационных технологий. Например, так называемый закон Меткалфа (одного из основателей Ethernet), утверждающий, что использование вычислительных сетей возрастает пропорционально квадрату количества пользователей. При этом рост Интернет-трафика удваивается за пять лет (то есть удваивается примерно за полтора года).

Есть несколько интересных «соседей» закона Мура, также относящихся к полупроводниковой промышленности и даже иногда называемых «вторым», «третьим» и так далее законами Мура, но на деле таковыми не являющимися. Например, что стоимость строительства современной микроэлектронной фабрики удваивается каждые три года и к 2010 году достигнет фантастической суммы в 50 миллиардов долларов.



Или то, что вычислительная и/или тепловая мощность микропроцессоров растёт примерно теми же темпами, что и число элементов на кристаллах. Одно время в Intel закон Мура «подогнали» даже для частоты микропроцессоров (так, с 2000 до 2004 года за счёт роста частоты производительность процессоров Intel утроилась), но потом от этой затеи благоразумно отказались. Да и сам Гордон Мур в недавнем интервью подтвердил, что его закон относится только к числу транзисторов на кристалле, хотя и отражает общие для многих процессов экспоненциальные закономерности развития.

Более близкими и интересными косвенными *следствиями* закона Мура являются следующие: например, от поколения к поколению технологических процессов производства микросхем происходит двукратное уменьшение площади характерных элементов (например, одного транзистора) на кристалле, при этом линейные размеры уменьшаются на 30%.



А сама смена поколений техпроцессов (по крайней мере, у Intel, но конкуренты также близки к этому графику) с завидным постоянством (уже почти 20 лет) происходит раз в два года



и будет происходить теми же темпами в ближайшем будущем.

Continuation of Moore's Law

Intel found a solution for High-k and metal gate

Process Name	P856	P858	Px60	P1262	P1264	P1266	P1268	P1270
Start Production	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011
Process Generation	0.25 μ m	0.18 μ m	0.13 μ m	90 nm	65 nm	45 nm	32 nm	22 nm
Wafer Size (mm)	200	200	200/300	300	300	300	300	300
Inter-connect	Al	Al	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	?
Channel	Si	Si	Si	Strained Si	Strained Si	Strained Si	Strained Si	Strained Si
Gate dielectric	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	High-k	High-k	High-k
Gate electrode	Poly-silicon	Poly-silicon	Poly-silicon	Poly-silicon	Poly-silicon	Metal	Metal	Metal

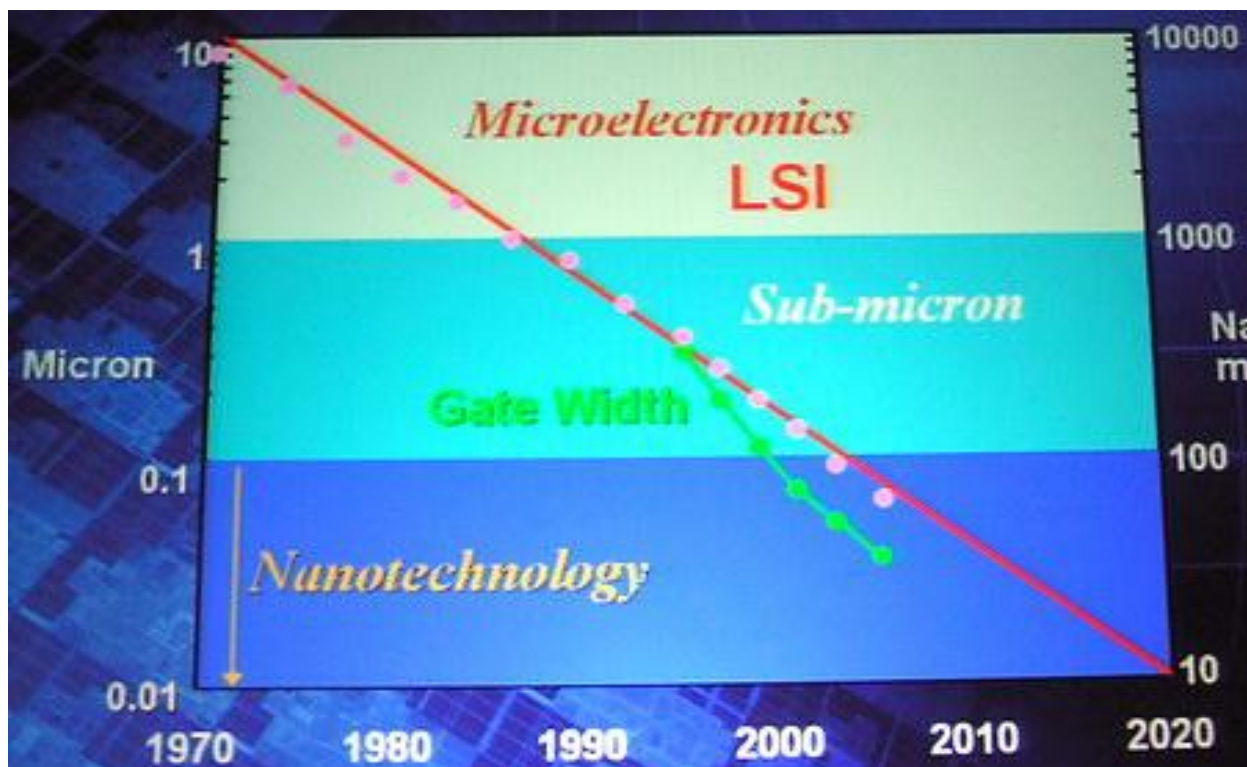
Potential candidate for introduction

Subject to change

Up to 22nm!

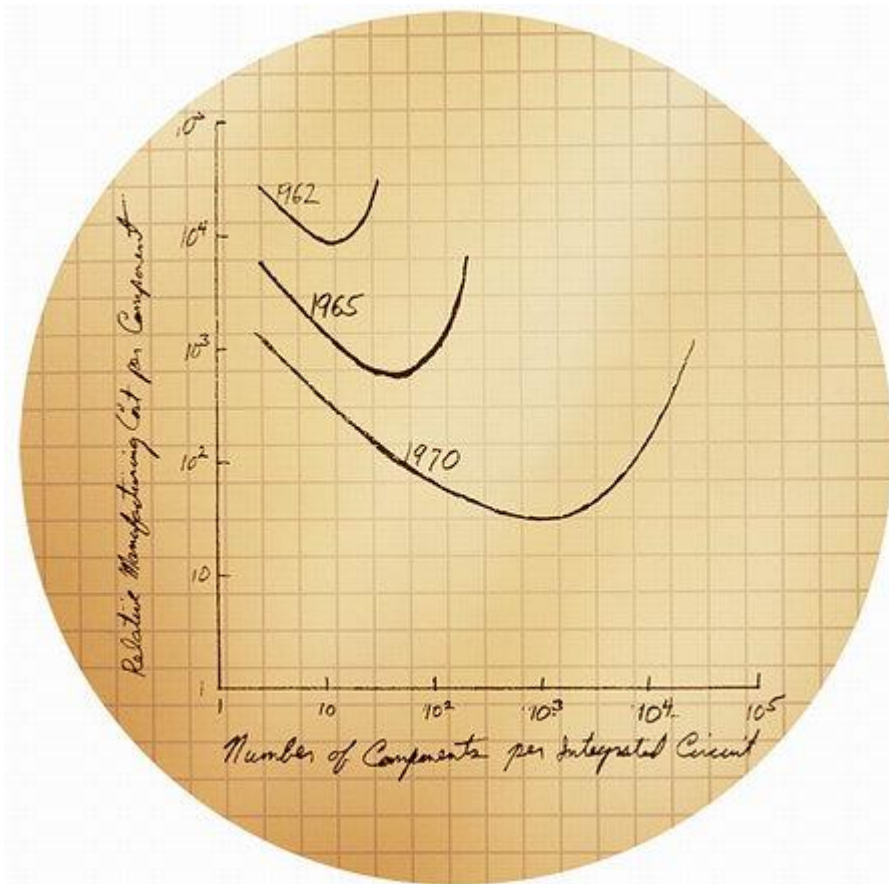
Source: Intel

Причём если технологические нормы (то есть минимальная толщина «рисуемой» линии на кристалле) продолжают следовать этому «закону Мура», «уполовиниваясь» каждые 4 года, то реальные физические размеры некоторых важных элементов (например, эффективная длина затвора транзисторов) в последние годы уменьшается даже быстрее по причине перехода к нанотехнологиям и размерам элементов менее 100 нм.



И чем дальше, тем больше это будет заметно.

Другим важным и фундаментальным следствием закона Мура, которое сформулировал сам Гордон Мур еще в той знаменитой статье 1965 года,



является экспоненциальное уменьшение стоимости одного транзистора на кристаллах массовых микросхем.

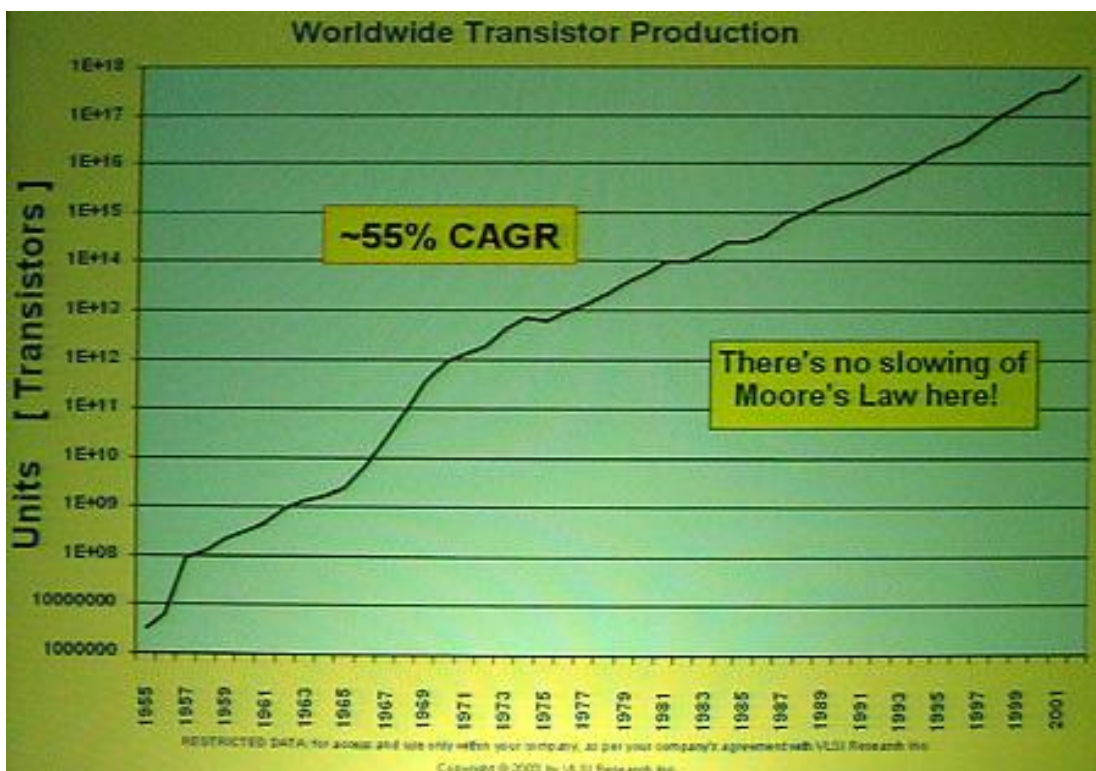


А особенно это стало заметно после перехода на 90-нм технологию и пластины диаметром 300 мм (см. следующий слайд). Фактически, этот переход привел к более чем 50-процентному снижению себестоимости одного транзистора за год!



И сейчас себестоимость производства транзисторов в микросхемах упала до такой степени, что теперь один транзистор обходится примерно во столько же, сколько стоит напечатать любой типографский знак в газете – например, запятую.

В соответствии с «законом Мура» (точнее, с сопутствующими ему закономерностями) в мире возрастает и количество производимых транзисторов.



Так, в 2003 году Гордон Мур подсчитал, что количество транзисторов, ежегодно поставляемых на рынок в мире, достигло 10.000.000.000.000.000 (10¹⁹). Это в сто раз больше, чем количество муравьев на Земле. А что же будет по итогам 2005 года, если ежегодный прирост составляет более 55%?..

На чём же основан закон Мура, и почему столь незатейливая формулировка закона развития микроэлектроники вот уже сорок лет на все лады цитируется авторитетными персонами? Почему закон Мура стал настолько универсальным, что его пытаются использовать для многих других сегментов ИТ-рынка: для роста сети Интернет и пропускной способности каналов связи, для предсказания увеличения ёмкости и плотности записи в жёстких дисках и многого другого? Сам Мур как-то сказал, что не знает, в чём природа этой закономерности, но очевидно, что она отражает тенденции экспоненциального развития ряда явлений в современном мире. Обнаруживая действие закона Мура во всё новых сферах высоких технологий, мы лишь подтверждаем наличие постоянного, очень быстрого прогресса технологий, а значит, и всей мировой экономики. А сам закон Мура стал популярен потому, что в на редкость простой, доступной пониманию каждой форме определяет фантастические, пока недоступные ни одной другой отрасли экономики, темпы развития полупроводниковой индустрии. Ведь если бы, например, авиаиндустрия развивалась в соответствии с законом Мура, то сегодня перелёт по маршруту Нью-Йорк-Париж, который в 1978 году стоил около 900 долларов и длился 7 часов, обошелся всего в цент и занял бы менее одной секунды!

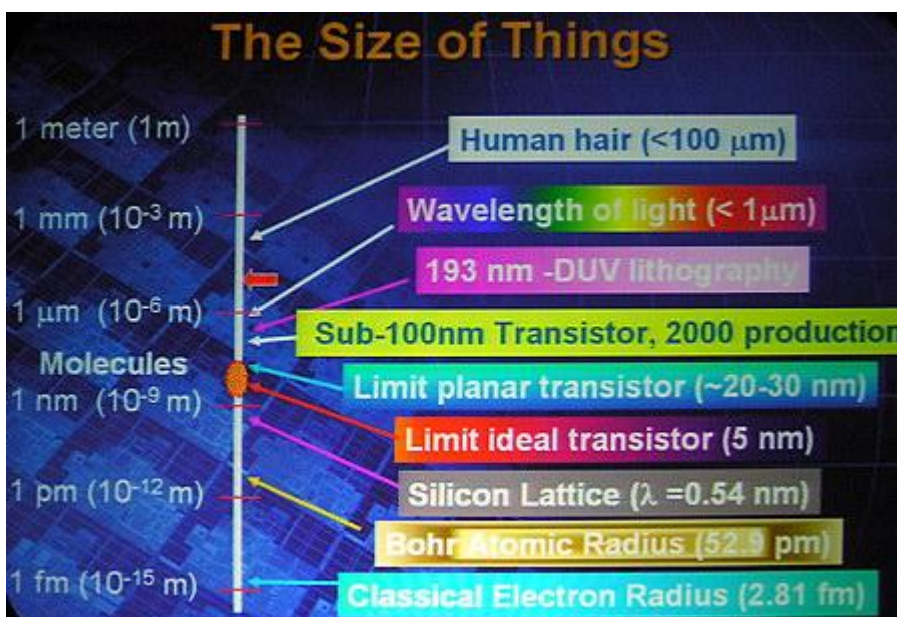
Закон Мура стал синонимом технологической эволюции и последовательных шагов, которые ИТ-индустрия проходит, чтобы раскрыть нам новые возможности жить и работать, новые модели использования инфраструктуры, создать саму новую инфраструктуру для жизни и экономического роста. «Закон Мура – основной лейтмотив нашей деятельности в области конвергенции вычислительных и коммуникационных возможностей, – заявил глава корпорации Intel Крейг Барретт, открывая весенний (этого года) Форум Intel для разработчиков. – Приверженность корпорации Intel закону Мура позволяет нам создавать интегрированные платформы, которые предоставляют широкий диапазон возможностей для отдельных людей и организаций, использующих эти технологии.».

Новый смысл закону Мура может придать «расширение» его действия на смежные отрасли. Этим, в частности, занимаются и в Intel. На одном из недавних Форумов Intel для разработчиков Патрик Гелсингер, тогда ещё главный технический директор корпорации Intel, сказал: «Наша задача состоит сегодня не только в том, чтобы продлить жизнь закону Мура, но и в том, чтобы максимально расширить сферу его действия, распространив его и на другие области». Среди них – биология, медицина, сельское хозяйство, оптика, беспроводные коммуникации и прочее.



К сожалению, другие отрасли мировой экономики заметно уступают информационным технологиям по темпам своего развития. Но фактически, вся мировая экономика, которая уже просто немислима без вычислительной техники, сейчас зиждется на стремительном росте полупроводниковой промышленности. Поэтому некоторые аналитики даже предсказывают, что «конец эпохи закона Мура» (то есть когда микросхемы перестанут развиваться столь быстрыми темпами в силу ряда фундаментальных физических ограничений) приведёт к новой Великой депрессии, до самых основ потрясшей американскую экономику в тридцатые годы прошлого века.

К счастью, несмотря на то, что за прошедшие годы скептики многократно предсказывали закону Мура скорую кончину, ученые и инженеры (в том числе, корпорации Intel) своими открытиями и упорным трудом снова и снова подтверждали провидческий дар и безупречность выводов одного из отцов-основателей корпорации. И каждый раз сдвигали «кончину» закона Мура далеко в будущее. Как же обстоят дела сейчас? Ведь современная технология уже почти вплотную подошла к атомарным пределам для традиционной кремниевой технологии производства микросхем.



И скептики всю горланят о конце «золотого века» микроэлектроники: «наступают» утечки, высокое тепловыделение кристаллов, сложности с повышением частоты работы

микропроцессоров, состоящих из миллиарда транзисторов, «разбросанных» по большой площади кристалла и прочее.

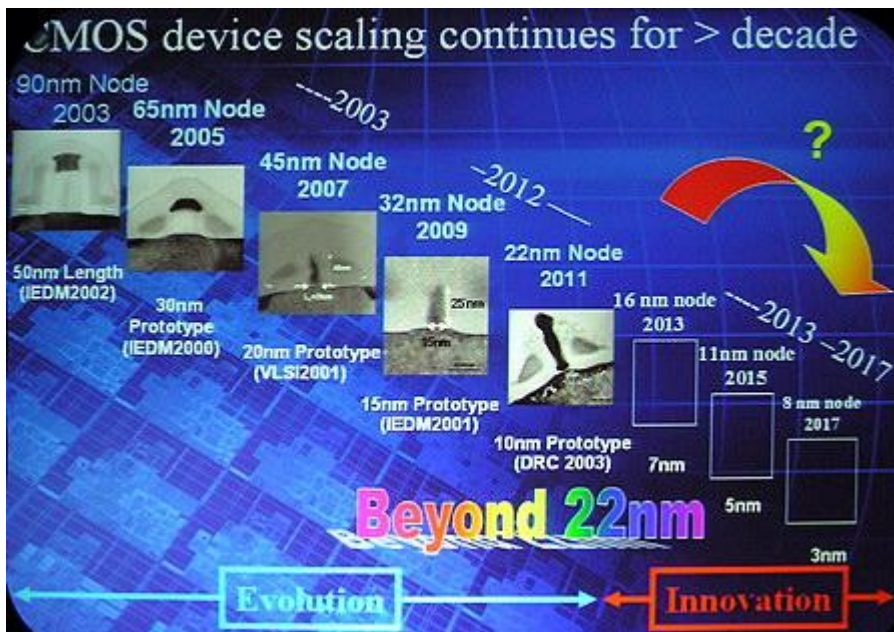
На последнем Форуме Intel для разработчиков Паоло Джарджини, директор по технологической стратегии корпорации Intel, подтвердил, что закон Мура продолжает действовать, и что в полном соответствии с ним корпорация Intel продолжает вводить новые технологические процессы каждые два года (см. рисунок выше). А залогом успешной деятельности Intel на этом направлении служат ежегодные многомиллиардные вложения корпорации в научно-исследовательские разработки, постоянную модернизацию и расширение своих производственных мощностей. Достаточно сказать, что в 2005 году Intel планирует израсходовать на эти цели более 10 миллиардов долларов!

В доказательство потенциала закона Мура для современной кремниевой технологии можно привести успешные работы Intel (и некоторых других ведущих мировых компаний) по разработке и внедрению более «тонких» технологических процессов производства микросхем, работы по которым идут полным ходом, и где уже видны некоторые успехи.

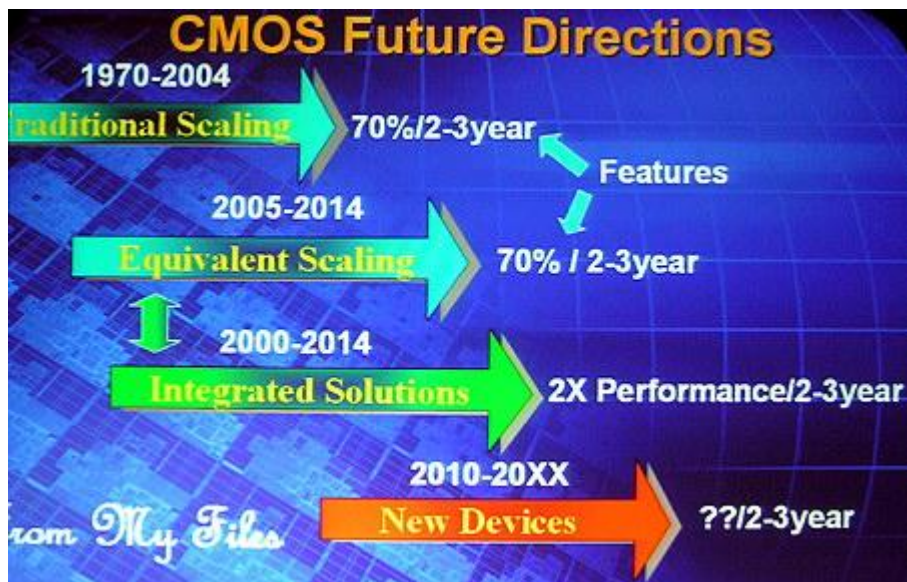


Например, производство памяти и процессоров по технологии 65 нанометров уже почти отлажено и начнётся в этом году, на 2007-й намечен переход на 45-нанометровый процесс, на 2009 год – внедрение 32-нанометрового, а в 2011 году настанет черёд технологического процесса 22 нм. Причём в корпорации Intel уже есть конкретные научно-технические разработки, которые позволяют реализовать все эти планы.

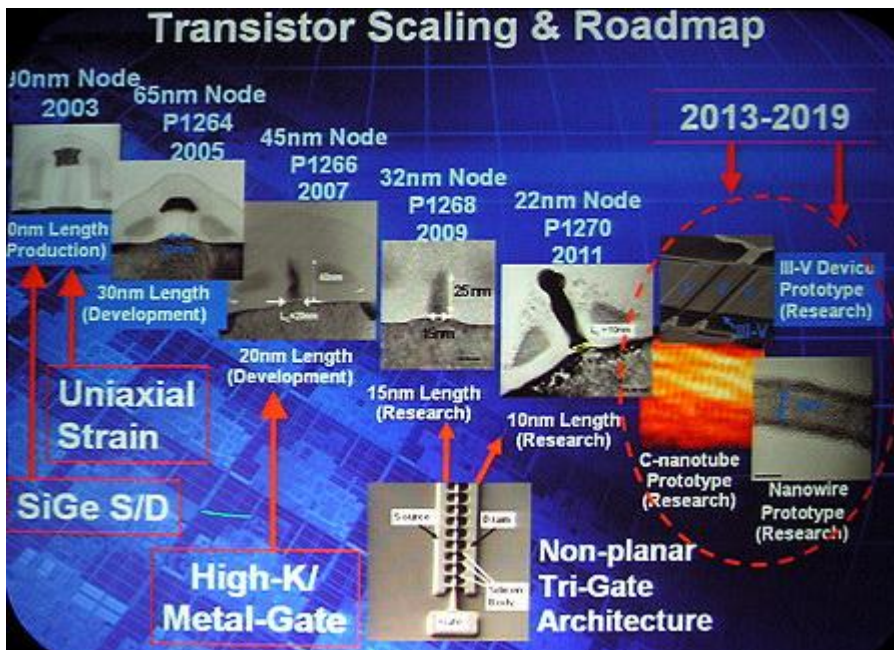
Но что ожидается после 2011 года? Продолжит ли закон Мура действовать позднее, и если да, что этому будет способствовать? Неужели станет возможным создание транзисторов по технологиям 16, 11 и 8 нм с длинами затворов транзисторов 7, 5 и 3 нм соответственно?



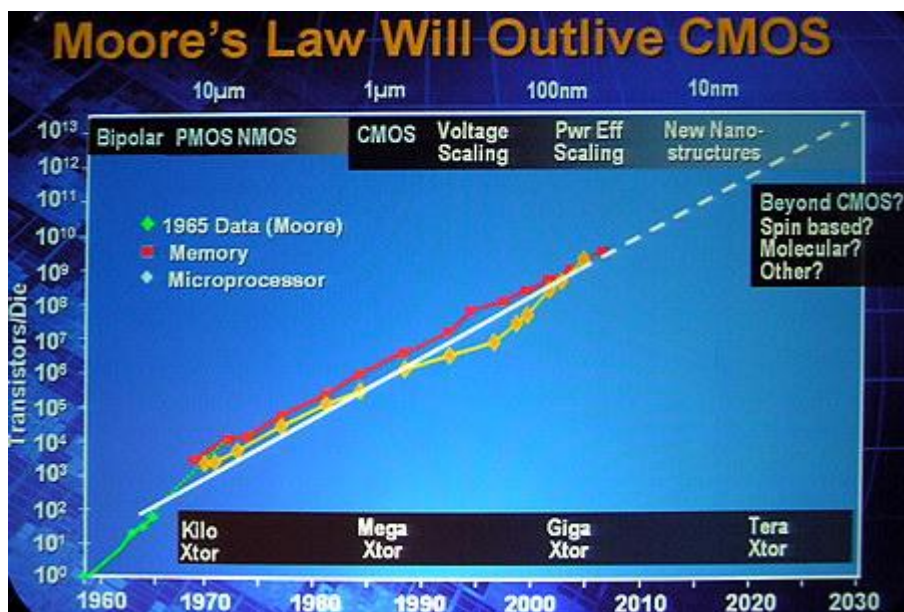
Если предыдущее (вплоть до 22 нм) развитие отрасли кремниевой технологии производства микросхем можно назвать эволюционным, то ниже 22 нм потребуются принципиально новые, инновационные решения. Среди путей дальнейшего развития КМОП-технологии в соответствии с законом Мура рассматриваются как применение эквивалентного масштабирования размеров элементов вместо традиционного геометрического, так и поиск новых типов кремниевых приборов (например, трехзатворных и даже «круглых» транзисторов). А кроме того, важную роль могут сыграть решения по повышению степени интеграции элементов на кристаллах – те же многоядерные системы, трехмерные многослойные микросхемы и прочее.



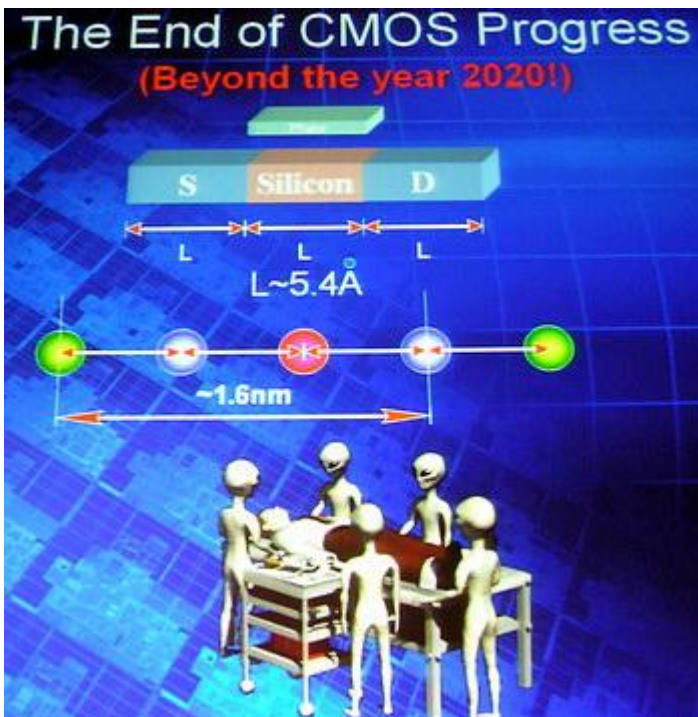
Еще более кардинальными выглядят попытки создания принципиально новых наноструктур. Альтернативными кремнию материалами здесь могут послужить как структуры на основе соединений III и V групп таблицы Менделеева (например, InSb), обладающие уникально высокой подвижностью электронов, так и углеродные или кремниевые нанотрубки, способные выступать в качестве как проводников, так и полупроводников.



Транзисторы, изготовленные из таких материалов, имеют сопоставимые размеры – единицы нанометров (например, диаметр углеродных нанотрубок – 1-2 нм). Однако, по утверждению Паоло Джарджини: «Экзотические структуры, такие как углеродные нанотрубки, могут найти применение в КМОП технологии не столько для ускорения темпов миниатюризации, сколько для повышения производительности устройств или, возможно, упрощения их изготовления. Даже если для цифровой логики будет изобретено принципиально иное средство перемещения электронов, возможности его масштабирования для повышения плотности и производительности не зайдут много дальше пределов, достижимых технологией КМОП, главным образом, из-за ограничений, налагаемых требованием отвода тепла».



Вплоть до 2020 года Intel сможет создавать транзисторы по современной схеме работы – с электродами и затвором между ними. К тому времени, однако, размеры всех элементов транзистора достигнут атомарных размеров, и уменьшать их дальше будет просто невозможно.



Следовательно, уже сейчас необходимо искать новые подходы. Один из них – организация передачи сигнала на уровне элементарных частиц, путём спиновых волн. В лабораториях Intel уже сейчас разрабатываются идеи, которые будут воплощены в чипах только лет через десять. Одна чисто теоретическая идея заключается в многократном использовании электронов. В современных архитектурах электроны перемещаются от истока к стоку, а затем теряются. «При утилизации вы просто переносите электрон в другое место, — пишет Джарджини в одной из своих работ. — Можно производить множество операций, не теряя электронов».

Таким образом, уже на протяжении сорока лет развитие микроэлектроники служит главной движущей силой всемирной технологической революции, принеся радикальные позитивные перемены в жизни миллиардов людей. Практическая деятельность Intel и других микроэлектронных гигантов и научных центров не только продлевает жизнь закону Мура, но и распространяет его действие на самые разные сферы. Микропроцессоры становятся вездесущими, а достижения высоких технологий — максимально демократичными. Закон Мура открыл и продолжает открывать новый, удивительно увлекательный и разнообразный цифровой мир. «Честно говоря, я часто спрашивал себя, когда же закончится действие закона Мура, как долго мы ещё сможем пользоваться его плодами? — отметил в одном из своих выступлений Патрик Гелсингер. — В 1980 году, когда я пришел в Intel, мы ломали голову над тем, как достичь технологической нормы производства микропроцессоров в 1 микрон. В девяностые годы перед нами встала задача внедрить технологическую норму в одну десятую микрона, и опять она казалась нам недостижимой. А сегодня мы думаем о том, как преодолеть барьер в одну сотую микрона. Могу пообещать вам, что до моей пенсии, то есть в течение ещё двадцати пяти лет, закон Мура будет действовать. Уверен, что ещё не одно десятилетие он будет руководящим принципом развития отрасли».



Послесловие

Гордон Мур (Gordon E. Moore) был одним из основателей Intel в августе 1968 года и в течение последующих семи лет занимал должность исполнительного вице-президента корпорации. В 1975 году он стал президентом и главным управляющим Intel и занимал обе должности до 1979 года, когда пост президента сменил на должность председателя совета директоров. Главным управляющим корпорации Intel доктор Мур работал до 1987 года, а на посту председателя совета директоров – до 1997 года, когда его удостоили звания почетного председателя совета директоров. Ныне 76-летний Гордон Мур является почетным председателем совета директоров корпорации Intel и проживает на Гавайях, откуда, в преддверии сорокалетия годовщины выхода своей знаменитой статьи, он любезно согласился ответить на вопросы по телефону. Выдержки из этой почти часовой беседы мы предлагаем вашему вниманию.

Вопрос: Как Вы открыли этот закон? Что бы было с индустрией, не будь той публикации?

Ответ: Ну было бы забавно, если бы кто-нибудь из параллельной вселенной проделал такой эксперимент. Цель той статьи была такая – дать прогноз развития интегральных схем на ближайшие 10 лет, особенно в свете того, что поначалу они развивались как дорогие военные микросхемы, и было бы интересно, смогут ли они стать в ближайшее время недорогими потребительскими. Если бы я не опубликовал эту статью в 1965 году, тенденции всё равно стали бы очевидными лет через десять. Я не думаю, что эта статья внесла бы какую-то разницу. Просто я работал в такой должности, что имел возможность увидеть тогда эту тенденцию (Fairchild Semiconductors тогда была самым крупным производителем микросхем). Поначалу этот закон имел малую силу, индустрия металась в поисках новых идей. Первый большой вклад внесли японские производители памяти в 70-х годах, когда технология выглядела ещё малопредсказуемой. Производя чипы от 1К до 4К и до 16К, они имели метод, посредством которого можно было увидеть, когда стоит остановиться и занять лидирующие позиции на рынке. Кстати, я перечитал эту статью год назад и был приятно удивлён, что, оказывается, предсказал использование компьютеров на дому. Я и забыл об этом, когда был на посту CEO и отклонил идею домашнего компьютеринга вообще. Один из наших молодых инженеров тогда пришел ко мне с идеей компьютера для дома. Я сказал, что это занятно, но для чего он будет использоваться дома? Он смог придумать только, что домохозяйка сможет там держать рецепты и вычислять для них подходящие пропорции. И я решил, что это не слишком мощное приложение и что Intel пока нет смысла заниматься персональным компьютером.

Вопрос: Как вы оцениваете развитие компьютерной индустрии за истекшие 40 лет?

Ответ: В общем, компьютерная индустрия сделала «отличную работу» за все эти годы. Например, в моем офисе уже давно находилась кремниевая пластина с надписью «100% выход годных кристаллов» (и наверняка, у Intel сейчас таких пластин немало), хотя в пору написания первой статьи в 1965 году это было нереально. С другой стороны, некоторые программные интерфейсы, например, от Microsoft, заслуживают критики. Впихивая всё больше возможностей и функций приложения, программисты могут на самом деле двигаться назад, а не вперед. Мне определенно хочется иметь более простой интерфейс, хотя я не знаю, на что он должен походить.

Вопрос: Как Вы относитесь к нанотехнологиям и их перспективам заменить кремниевые технологии? И сколько ещё будет действовать закон Мура?

Ответ: Здесь я скептик. В кремниевые технологии вложена уйма денег, которых пока нет у нанотехнологий. Я не хочу сказать, что нанотехнологии не имеют феноменального потенциала. Я думаю, что есть много мест, где они дадут большой вклад (сенсоры, биология, MEMS), но я не думаю, что замена электронных схем – одно из них. По крайней мере, не в течение ближайшего времени и не в отношении массовых микросхем. Есть большая разница между тем, чтобы сделать один тонкий транзистор или миллиард их вместе для реализации заданных функций. Впрочем, наши современные микросхемы производятся по технологиям, которые тоже можно назвать нанотехнологиями. Закон Мура продержится ещё лет 10-20, пока мы не подойдем вплотную к атомарному пределу.

Вопрос: Какой компьютер Вы используете сегодня и меняете ли Вы его каждые 18 месяцев?

Ответ: У меня компьютер на Centrino. На самом деле, цикл замены компьютеров в Intel – 2-3 года, и я до сих пор в этом участвую.

Вопрос: Впервые Intel возглавит человек, не имеющий научной степени (Ph.D.; имеется в виду Пол Отеллини, который скоро сменит Крейга Барретта). Изменит ли это культуру компании?

Ответ: Я так не думаю. Pan Odaleny, как я неправильно произносил его имя почти 30 лет, определенно более технически компетентен в этой области, чем я или Энди Гроув когда-либо были. И тот факт, что у него не техническое образование, не является недостатком после 30 лет его работы в этой индустрии.

Вопрос: Что вы думаете по поводу искусственного интеллекта?

Ответ: Компьютеры в том виде, в котором они сегодня созданы, не могут приблизиться к тому, чтобы заменить человеческий разум, потому что они были с самого начала спроектированы для обращения с информацией по-другому. Ученым следует более ясно постичь, как работает разум, и только затем спроектировать компьютер на манер подражания ему. Думаю, что сейчас компьютеры развиваются по неправильному пути, пытаясь подменить человеческий рассудок. Тем не менее, они могут имитировать части человеческого рассудка, такие как способность распознавать язык и различать, когда человек говорит «two» или «too». Думаю, что когда компьютер станет хорошо распознавать речь, это кардинально изменит модели использования компьютеров в нашей жизни. Но этот уровень интеллекта станет доступен через 10, а то и через 50 лет.

Вопрос: Могли бы Вы сформулировать новый закон развития индустрии на следующие 40 лет?

Ответ: Нет, я уже несколько лет не нахожусь так близко к современной компьютерной индустрии, как был когда-то, поэтому не совсем в курсе самых последних достижений, чтобы делать подобные прогнозы. Думаю, что останусь поживать на лаврах своего прежнего закона.

