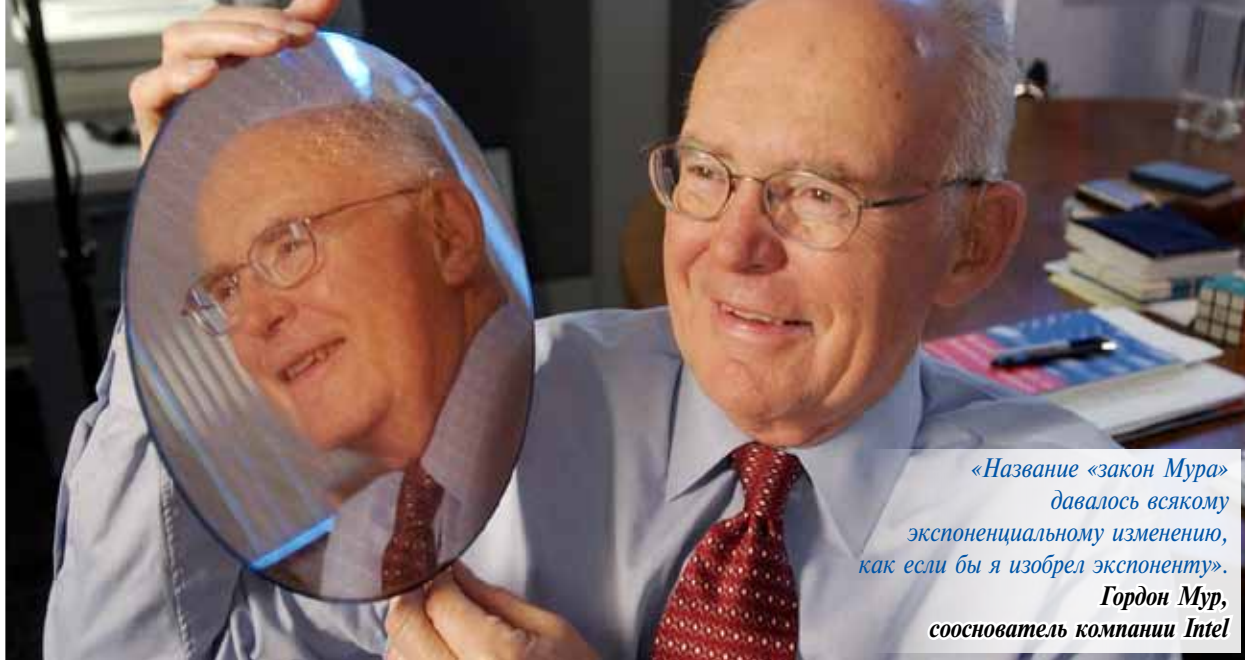




«Название «закон Мура»
давалось всякому
экспоненциальному изменению,
как если бы я изобрел экспоненту».
Гордон Мур,
сооснователь компании Intel

Полвека в законе

19 апреля 2015 года исполнилось ровно пятьдесят лет с того момента, как Гордон Мур — основатель компании Intel — впервые сформулировал свой знаменитый «закон». Событие, что и говорить, знаковое для всей ИТ-отрасли.

В 1965 году, за три года до того, как стать одним из основателей компании Intel, Гордон Мур сделал наблюдение относительно будущего развития информационных систем, а точнее — транзисторов, этих основополагающих компонентов микропроцессоров и эпохи цифровых технологий в целом. Он предположил, что их стоимость будет уменьшаться, а производительность решений на основе транзисторов наоборот — увеличиваться. Причем оба фактора будут развиваться в геометрической прогрессии. С тех пор прошло полвека, а «закон Мура» все еще не утратил своей актуальности.

Что сказал Мур?

Так, по крайней мере, выглядит история появления «закона» с точки зрения маркетологов Intel. Но как обычно бывает, за годы, отделяющие нас от события, кое-что могло исказиться. Значит, тем более интересно вспомнить, что же на самом деле сказал, а главное — имел в виду Гордон Мур (рис. 1), когда пятьдесят лет назад сформулировал закон имени себя.

Первым упоминанием «закона» считается публикация «Втискивая еще больше компонентов на интеграль-

ные схемы», появившаяся в журнале Electronics от 19 апреля 1965 года (отсюда и такая точность датировки) под авторством директора исследовательского отдела Fairchild Semiconductor Гордона Мура, где он, в частности, отметил, что **наиболее выгодное число компонентов на одном кристалле удваивается каждый год**. Оригинал статьи, кстати, имеется в Интернете (<http://www.cs.utexas.edu/~fussell/courses/cs352h/papers/moore.pdf>). При этом он предположил, что тенденция сохранится в ближайшие десять лет. Важно отметить, что в первоначальном виде подразумевалась вычислительная система вообще (включая память), а не только процессор. Сегодня эта формулировка звучит весьма непривычно (что значит «наиболее выгодное», и где здесь что-то про 18 или 24 месяца?).

Но дело в том, что в 60-х процесс производства чипов отличался от современного, и очень актуальным вопросом была гранулярность: как оптимально распределить транзисторы по отдельным блокам. С одной стороны, можно было «собрать» процессор из большого числа малых фрагментов (скажем, отдельных транзисторов, упакованных каждый в свой корпус), на другом полюсе —

создание всей системы единым блоком. Оба варианта — это крайние случаи, одинаково непригодные в тех условиях. Первый по причине дороговизны и сложности такого процесса, второй из-за риска высокого процента появления бракованных изделий (ведь в случае ошибки производства придется выбросить не транзистор или блок, а чип целиком). Поэтому в те годы велся активный поиск **выгодного числа транзисторов на одном кристалле**, т.е. модели, при которой будет соблюден баланс между расходами на создание чипа и максимальным количеством элементов на нем (от которых напрямую зависит производительность). Так вот, Мур предположил, что оптимальное число элементов будет удваиваться каждый год, и даже нарисовал два графика (для 1962, 1965 и 1970 годов), вид которых сегодня известен многим (рис. 2).

Что касается пресловутого «закона», то в 1975 году, через десять лет после упомянутой публикации, в своей новой статье («Прогресс в цифровой интегральной электронике») Мур отметил, что его первое предсказание сбылось — число транзисторов на чипе действительно удваивалось каждый год. Но к моменту

выхода статьи этот показатель должен был перевалить за 50 тыс., а реально работающие образцы имели только 16 тыс. Тогда в качестве подтверждения своей правоты Мур взял для примера чип памяти, который только разрабатывался Intel и содержал 32 тыс. транзисторов и добавил к ним еще и 32 тыс. конденсаторов в элементах памяти (RAM). Все честно — ведь в первоначальной формулировке использовался термин «компоненты» ☺.

Далее в статье Мур делает вывод, что тенденция удвоения выгодного числа транзисторов продлится до 1980 года, а затем **каждые два года будет происходить удвоение плотности транзисторов на кристалле**. В том же году один из руководителей Intel Дэвид Хаус (который придумал знаменитое Intel Inside) высказал предположение, что **удвоение числа транзисторов в процессоре каждые 24 месяца, вместе с увеличением их тактовой частоты, приведет к удвоению их производительности каждые 18 месяцев**. Эту фразу почему-то стали также именовать «законом Мура». Далее высказывание пошло «в массы», было подхвачено прессой и маркетологами, в результате появилось множество различных вариантов (большинство из которых никак не связаны с оригинальными формулировками). Вот наиболее распространенные из них:

Действительно принадлежат Гордону Муру

- наиболее выгодное число транзисторов (компонентов) на кристалле удваивается каждый год;
- число транзисторов в производимых чипах удваивается каждые два года;
- технологически возможное число транзисторов на кристалле удваивается каждые два года.

НЕ принадлежат Гордону Муру

- производительность (в другом варианте — тактовая частота) процессора удваивается каждые 18 месяцев;
- вычислительная мощность компьютера (варианты: доступная вычислительная мощность, вычислительная мощность, доступная за \$1) удваивается каждые 18 месяцев;

- плотность транзисторов на чипе удваивается каждые 18 месяцев;
- стоимость чипа падает вдвое каждые 18 месяцев.

Но этого показалось мало, и в 1998 году сотрудник Intel Юджин Мейеран сформулировал «второй закон Мура»: стоимость фабрик, необходимых для производства процессоров, удваивается с каждым новым поколением чипов (т.е. каждые четыре года). Во всех вышеприведенных формулировках интересно то, что сам Мур, по крайней мере до 2000 года, ни разу не называл ни один из подобных «законов» своим именем.

Также стоит отметить, что «законом» высказывания Мура являются в первую очередь именно для компании Intel, хотя их автор говорил о развитии отрасли микроэлектроники вообще. Если проанализировать показатели других производителей, то «законы Мура» почти во всех случаях так или иначе нарушаются, поскольку размещение все большего числа транзисторов не является самоцелью для большинства производственных компаний. Существуют и другие методы повышения эффективности.

Однако самое уязвимое место всех вариантов «закона» — это их линейность, а как показывает история, технологии часто развиваются скачками, а не путем равномерной эволюции.

Немного о технологиях

К самому «закону Мура» и к его формулировкам можно относиться по-разному. Несомненно одно: для его подтверждения продлевается колоссальная работа, а технологии, лежащие в основе процесса, порожденного «законом», на сегодняшний день являются квинтэссенцией всех результатов научно-технического прогресса человечества.

Размещение все большего числа транзисторов на примерно одной и той же площади кремниевой подложки (при этом оставаясь в рамках приемлемой себестоимости) требуют просто фантастически сложных технологий, главной из которых является фотолитография. Собственно, это самый дорогостоящий этап производства микросхем, на который приходится до половины всех расходов.



Рис. 1. Гордон Мур: раньше и теперь

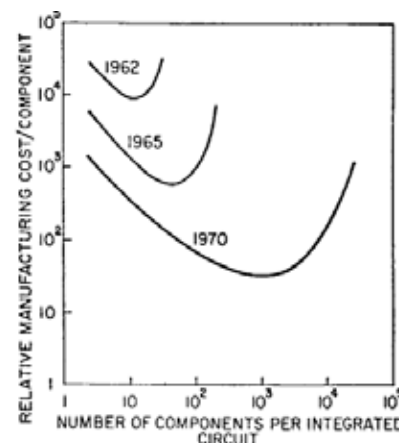


Рис. 2. Первые авторские графики «закона» Мура

В процессе фотолитографии используются так называемые «сканеры» для изображения (импринтинга) определенной схемы на каждом кристалле (рис. 3).

На поверхность подложки особым методом наносится светочувствительный и стойкий к травлению материал (фоторезист), который затем застывает. Дальнее ультрафиолетовое излучение с длиной волны 193 нм, создаваемое лазером на фториде аргона, проходит через трафарет, осуществляя печать структуры схемы. Области фоторезиста, которые подверглись воздействию излучения, растворяются. Химический процесс оставляет рисунок, заданный маской.

В качестве подложки, например, на заводах Intel выступают круглые пластины из особого «электронного» кремния толщиной 1 мм и диаметром 300 мм (сейчас осуществляется переход на 450 мм), которые нарезаются из специального цилиндра и полируются до зеркального блеска (рис. 4).

Сами цилиндры Intel закупает у партнеров. После нанесения схемы прямо на пластине чипы проверяются особым тестером, затем пластина разрезается на отдельные чипы, при этом некондиционные экземпляры, которых может быть до 80%, отбраковываются, а годные — упаковываются в корпус.

Но классическая схема литографии имеет свой предел. Когда техпроцесс производства транзисторов дошел до 32 нанометров, пришлось существенно изменить технологию. Для этого воздушное пространство между линзой и подложкой начали

заполнять водой (это называется иммерсионной литографией). С учетом более высокого коэффициента преломления воды сканер может создавать более миниатюрные элементы без изменения размеров линзы. Дальнейшее выполнение «закона» Мура потребовало нанесения рисунка в несколько слоев, для того чтобы реализовать новые функциональные возможности на кристалле. Но ведь 32 нм, как мы знаем, не предел, а дальнейшее уменьшение размеров транзисторов привело к весьма интересным физическим эффектам, вызывающим искажения исходных изображений схем.

Так, при использовании 14-нм техпроцесса происходят мало предсказуемые оптические искажения, и изображение с маски не проецируется на подложку как есть. Для определения оптимальных схем литографии теперь используются вычислительные ресурсы мощных дата-центров. Справедливости ради отметим, что сегодня для создания своих микросхем Intel использует три категории литографии: иммерсионную (для самых важных операций); сухую (для элементов среднего размера) и более раннюю технологию на основе излучения с длиной волны 248 нм, создаваемого лазером на фториде криптона (для крупных элементов).

Но чтобы двигаться дальше, необходимо использовать излучение длиной волны менее 193 нм. Но это уже другой процесс — ЭУФ-литография (ЭУФ это «экстремальный ультрафиолет») с длиной волны 135 нм, внедрение которого связано с



Рис. 3. Аппарат для нанесения фотолитографии

огромными трудностями — требуются новые установки, вакуумные системы и различные материалы для масок и фоторезиста. Источник излучения сейчас является основной проблемой полупроводников отрасли: для обработки большого количества подложек его мощность должна быть весьма велика. Кроме того, необходимо удешевить ЭУФ-технологию в целом.

Но и это еще не предел, с помощью перспективной технологии Multiple Electron-Beam Direct Write (MEBDW) когда-нибудь в будущем миллиарды лучей будут создавать транзисторы на кристалле, а технология Directed Self-Assembly (DSA) позволит формировать микроскопические структуры, недостижимые сегодня, на молекулярном уровне из «самоорганизующихся» цепочек полимеров.

Сегодня «закон» Мура — это скорее некая абстрактная философская идея, в которой заключено стремление человечества к прогрессу. Он сохраняет свою актуальность благодаря напряженному созидательному труду целой армии людей, которые изучают и используют фундаментальные законы физики. Сейчас на фабриках Intel по всему миру каждую секунду производится более 10 млрд. транзисторов, чипы на их основе используются в миллиардах устройств, работающих на всех континентах Земли. И так ли уж важно в этом свете, что действительно сказал Гордон Мур пятьдесят лет назад?

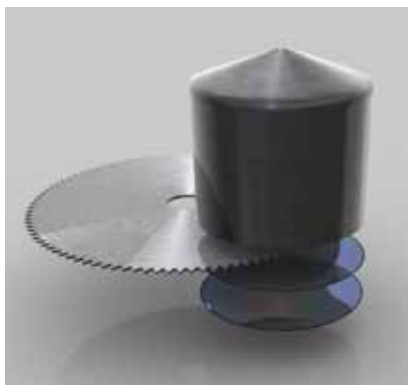


Рис. 4. Этапы создания процессора: «болванка» из «электронного» кремния и отполированные пластины

Игорь КИРИЛЛОВ, **СИБ**