

## НИЧТО НЕ БЕСКОНЕЧНО, НО ПРЕДЕЛ МОЖНО ОТОДВИНУТЬ!

Гордон Мур (Корпорация Intel)

*В феврале 2003 г. в Сан-Франциско (США) прошла очередная ежегодная инженерная конференция International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), посвященная фундаментальным вопросам развития полупроводниковой индустрии. Конференцию открыл основатель корпорации Intel, автор знаменитого закона Мура – Гордон Мур. Предлагаем вашему вниманию доклад господина Мура в сокращенном варианте.*

За последние 50 лет производство интегральных микросхем выросло из стадии младенчества и превратилось в крупнейшую отрасль мировой экономики. Помимо самостоятельной ценности, интегральные микросхемы стали основополагающим элементом всей электронной промышленности с годовым оборотом в триллион долл. США и нашли свое применение практически в любой продукции современной цивилизации – от автомобилей до поздравительных открыток. Оглядываясь назад, трудно поверить, что былые прогнозы, основанные на передовых научно-технических расчетах своего времени, предполагали, что себестоимость транзисторов может, в конечном счете, снизиться до 50 центов. Эти прогнозы не учитывали появления интегральных микросхем и их последующей эволюции, что в настоящее время позволяет объединить сотни миллионов транзисторов в рамках единой интегральной структуры.

Развитие и рост полупроводниковой промышленности в значительной степени обуславливались уникальными особенностями технологии создания интегральных схем и беспрецедентной адаптационной способностью рынка этих изделий. Наряду с обобщенным ежегодным приростом порядка 15%/г, объемы производства полупроводниковой продукции претерпевали взлеты и падения, которые переживала полупроводниковая промышленность в результате нарушения баланса между имеющимися производственными мощностями и потребностями рынка. При этом отметим плавный рост числа ежегодно выпускаемых транзисторов. За последние 30 лет объем ежегодного производства транзисторов вырос на 8 порядков, при этом обобщенный среднегодовой прирост составил 78%.

Среднегодовая цена транзистора за последние 30 лет снизилась на 6 порядков, составив в 2002 г. примерно 20 млн. долей цента. Более того, стоимость одного транзистора в современных модулях динамической оперативной памяти (DRAM) еще на порядок ниже. Небывалое снижение цены производимой продукции в сочетании с увеличением ее потребления и стало движущей силой развития всей полупроводниковой промышленности.

Тем не менее, экспоненциальное изменение любой физической величины не может длиться вечно. Та или иная причина всегда ограничивает продолжение роста. В полупроводниковой промышленности кривая экспоненциального развития многих процессов рано или поздно приближается к подобным ограничениям. Если мы хотим сохранить исторически сложившийся темп прогресса, потребуются новые обходные маневры. Полупроводниковой индустрии в ближайшее десятилетие или чуть позже снова придется преодолевать барьеры.

Уже в настоящее время выравнивание роста прибыли в полупроводниковой промышленности, начавшееся в 1994 г., дает повод для определенной озабоченности.

Основополагающий технологический фактор, обусловивший выдающиеся достижения отрасли, заключается в том, что уменьшение размеров устройств улучшает практически все характеристики электронной микросхемы. Транзисторы работают быстрее и потребляют меньше энергии. Возможности интегральной реализации сложных функций увеличиваются, в результате чего улучшается надежность систем, уменьшаются их размеры и масса, и обеспечивается возможность создания все более сложных систем, обладающих низкой стоимостью и повышенной надежностью. Но что самое важное – значительно увеличившаяся плотность размещения компонентов существенно снижает себестоимость продукции.

Минимальный размер элемента производимых интегральных микросхем с момента их первого появления снижался по экспоненте. Это вызвано тем, что производители микросхем вынуждены бороться за конкурентоспособность своей продукции. Как показано в докладе "Перспективы развития полупроводниковых технологий, 2001 г." (Technology Roadmap for Semiconductors, 2001 Edition), период между переломными моментами технологий приближается к двум годам вместо исторически сложившихся трех. Даже несмотря на увеличивающиеся технологические трудности и финансовые затраты, сопровождающие уменьшение размеров элементов, конкурентное преимущество, получаемое от выхода на рынок продукции следующего поколения, поддерживает процесс миниатюризации. Производители вынуждены корректировать свои разработки в направлении повышения конкурентоспособности в соответствии с новыми технологическими достижениями в отрасли.

За прошедшие годы несколько раз казалось, что технологические барьеры должны замедлить или даже остановить описанные выше тенденции, однако, поскольку ставки были высоки, компании-производители нашли способы обойти возникшие препятствия. Тем не менее, в течение двух ближайших десятилетий производители встретятся с новым и еще более фундаментальным барьером – вещества состоят из атомов, а зона действия современной полупроводниковой технологии приближается к размерам атомов. Указанная проблема, скорее всего, проявит себя в толщине диэлектрика, изолирующего затвор транзистора. По мере развития технологии данный параметр также уменьшался примерно по экспоненциальному закону. При использовании диоксида кремния в качестве диэлектрика затвора транзисторы следующего поколения будут иметь слой диэлектрика толщиной все-

го в несколько молекул. Впрочем, в данном случае есть возможность использования материалов с более высокой диэлектрической постоянной, что позволяет достичь заданных характеристик электрического поля посредством более толстого слоя изолятора. Такое решение отодвигает наступление описываемой проблемы.

Еще одна хорошо известная экспоненциальная зависимость описывает увеличение сложности интегральных микросхем. Поведение этой зависимости обуславливается уменьшением размеров фотошаблонов и улучшением технологии производственных процессов, что экономически оправдывает создание все более сложных кристаллов микросхем. Я первый уловил эту тенденцию на начальном этапе существования интегральных микросхем [1], когда пытался предсказать тенденции развития микроэлектроники на очередное десятилетие...

Многие другие параметры также имеют примерно экспоненциальный закон поведения, в основном из-за их связи с уменьшающимися размерами и увеличивающейся сложностью микросхем. Например, это справедливо для роста производительности компьютеров, обусловленного наличием более быстрых транзисторов и их числом, нарастающим по экспоненциальному закону. По экспоненциальному же закону увеличивается мощность рассеяния микропроцессорных интегральных схем, несмотря на все попытки уменьшить рабочее напряжение и минимизировать рассеивание токов.

Для того, чтобы исторически сложившаяся тенденция продолжилась, транзистор интегральной микросхемы должен сам эволюционировать, то есть избавиться от планарной структуры, обычно используемой сегодня. К настоящему моменту предлагаются несколько идей, которые призваны уменьшить рассеивание токов и обеспечить повышение быстродействия. Указанные идеи включают структуры полностью обедненного кремния на диэлектрике (fully-depleted SOI) [3], а также структуры с двумя [4] и тремя затворами [5]. Изменениям подвергается даже кристаллическая структура кремния. С целью повышения подвижности носителей заряда и, как следствие этого, улучшения рабочих характеристик транзистора его кристаллическая решетка деформируется [6]. Одно из наиболее радикальных нововведений, исследуемых в настоящее время: трехмерный транзистор с тремя затворами. Использование

подобных транзисторов позволит обеспечить прогресс технологии, по крайней мере, еще на несколько поколений. Технологические трудности продолжают нарастать; аналогичную нагрузку создают и финансовые проблемы. В качестве примера можно привести изменение стоимости литографической машины за последние несколько поколений развития микроэлектроники. Очевидно, что в отрасли, где рост доходов замедляется, этот фактор также представляет собой труднопреодолимое препятствие. Микроэлектроника встречалась с трудностями и раньше, однако все их успешно преодолела и достигла сегодняшних высот.

Существует множество способов решения проблем, стоящих перед микроэлектроникой в наше время. Изобретательность инженеров и ученых, преодолевавших возникавшие ранее препятствия, была фантастической, и я надеюсь, что так будет и впредь. По крайней мере, на несколько ближайших поколений существуют решения, которые обеспечат развитие отрасли примерно с той же скоростью, с какой оно происходило до настоящего времени. Однако, даже если в будущем циклы удвоения увеличатся, скорость развития полупроводниковой индустрии будет намного превосходить соответствующие показатели практически всех остальных отраслей техники. Полупроводниковая индустрия – действительно революционная технология!

#### Список литературы

1. *G.E. Moore*, "Cramming more Components onto Integrated Circuits", *Electronics*, vol. 38, no. 8, April 19, 1965.
2. *G. E. Moore*, "Progress in Digital Integrated Electronics", *Technical Digest of International Electron Devices Meeting*, p. 11, Dec. 1975.
3. *R. Chau, et al*, "A50nm Depleted-Substrate CMOS Transistor (DST)". Там же. Dec. 2001.
4. *X. Huang, et al*, "Sub 50-nm FinFET: PMOS". Там же. Dec. 1999.
5. *R. Chau et al*, "Advanced Depleted Substrate Transistors: Single-gate, Double-gate and Tri-gate", *Extended Abstracts of the 2002 International Conference on Solid State Devices and Materials*, Sept. 2002, Nagoya, Japan.
6. *S. Thompson, et al*, "A 90nm Logic Technology Featuring 50nm Strained Silicon Channel Transistors, 7 Layers of Cu Interconnects, Low k ILD, and 1,m2 6-T STAM Cell", to be published in the *Technical Digest of International Electron Devices Meeting*, Dec. 2002.

#### КАЛЕНДАРЬ

##### предстоящих мероприятий

28 мая 2003 г.

Семинар **"Технологии строительства интеллектуального здания"** пройдет в рамках VII Международной специализированной выставки **"SHK Moscow 2003"**.

Ключевые темы, которые будут представлены на семинаре.

- Технологии построения Систем Автоматизации и Управления Зданиями (САиУЗ): BASnet, EIB, LON.
- Ведущие компании в области САиУЗ выступят с докладами об особенностях и опыте использования наиболее популярных технологий автоматизации зданий. Для выступления на семинаре приглашены представители международных организаций, работающих в области систем автоматизации зданий: BMA, ASHRAE, ISO TC 205, CEN TC 247, CABA.



– Деятельность комитета НП "АВОК" "Интеллектуальные здания и информационно-управляющие системы". Презентация англо-русского словаря по системам автоматизации и управления зданиями. Комплекс стандартов АВОК по САиУЗ.

**Место проведения:** Москва, выставочный комплекс на Красной Пресне "Экспоцентр"

**Контактные телефоны:** (095)921-60-31, 921-80-48.

9–13 июля 2003 г.

12 Международная выставка электротехнических изделий, электробытовой техники и электроники, технологий, оборудования и материалов для их производства – **"ЭЛЕКТРО-2003"**

**Место проведения:** Москва, выставочный комплекс на Красной Пресне "Экспоцентр".

**Контактный телефон** (095) 255-37-33.