

Транзистор: 60 лет больших свершений маленького элемента

Транзистор. Занимательные факты

- Первый портативный радиоприемник располагал всего четырьмя транзисторами, первый микропроцессор Intel содержал 2300 транзисторов, а в новейших четырехъядерных процессорах Intel на базе 45-нанометровой производственной технологии, выпущенных на рынок в ноябре 2007 года, насчитывается до 820 миллионов транзисторов.
- Размер 45-нанометрового транзистора в 2000 раз меньше диаметра человеческого волоса.
- Более 30 миллионов 45-нанометровых транзисторов можно разместить на булавочной головке.
- Первый транзистор, созданный сотрудниками научно-исследовательского центра Bell Labs в 1947 году, можно было взять в руки, тогда как сотни новейших 45-нанометровых транзисторов Intel способны разместиться на поверхности одной красной кровяной клетки человека.
- Стоимость транзистора, интегрированного на кристалле новейшего процессора Intel, примерно в миллион раз ниже средней стоимости полупроводникового транзистора, ставшего основой интегральных микросхем в 1968 году. Если бы цены на автомобили снижались столь же стремительно, сегодня новый автомобиль стоил бы около 1 цента.
- По оценкам аналитиков, ежегодно на планете отгружается такое количество процессоров, которое содержит примерно 10^{19} транзисторов, что примерно в 100 раз больше всей популяции муравьев, живущих на Земле.

Этапы большого пути

Телевизоры, автомобили, радиоприемники, медицинские и бытовые приборы, компьютеры, космические «челноки» и даже программируемые дверные замки в гостиницах – наверное, сложно себе представить хоть один мало-мальски сложный электронный прибор из тех, что нас окружают, который не использовал бы транзисторы. Изобретение транзистора 60 лет назад сотрудниками научно-исследовательского центра Bell Labs стало важнейшим фактором, стимулировавшим внедрение многих замечательных инноваций и развитие технологий. Фактически, без транзистора было бы невозможно существование практически всей современной электронно-цифровой индустрии. Именно транзистор – крошечное устройство, элемент микросхемы, действующий подобно миниатюрному выключателю и тем самым позволяющий

реализовывать алгоритмы обработки информации – обеспечил феноменальный триумф компьютеров.

В чем же секрет успеха? Микроэлектроника неуклонно развивается, постоянно обогащая инновациями научно-техническое сообщество. Транзисторы с каждым новым поколением технологических процессов их изготовления становятся все более компактными, быстродействующими, все более экономно расходуют энергию. В ноябре 2007 г. инженеры Intel – впервые за многолетнюю историю существования полупроводниковых интегральных микросхем – нарушили кремниевую «монополию» при производстве транзисторов и ввели новые материалы в структуру полупроводниковых компонентов. Это позволило создать микропроцессоры на базе микроархитектуры Intel® Core™, использующие революционную 45-нанометровую производственную технологию с применением подзатворного изолятора (диэлектрика) на основе гафния с высоким коэффициентом диэлектрической проницаемости – high-k, а также металлического затвора, что обеспечивает рекордную производительность и эффективное энергопотребление.

Что же дальше? Корпорация Intel намерена и впредь раздвигать границы возможного за счет технологических инноваций, чтобы создавать новые виды продукции, способные качественным образом изменить нашу жизнь – то, как мы работаем, отдыхаем, обмениваемся информацией.

«Вкл» / «Выкл»



Официальной датой появления на свет первого транзистора считается 23 декабря (по другим данным – 16 декабря) 1947 года, авторами этого замечательного изобретения стали американские физики Уильям Шокли (William Shockley), Джон Бардин (John Bardeen) и Уолтер Браттейн (Walter Brattain). Правда, первоначально ученая общественность встретила это изобретение достаточно прохладно, но уже в 1956 году все три американца были удостоены Нобелевской премии в области физики. Причем, впоследствии Джон Бардин стал единственным за всю историю «нобелевки» дважды лауреатом в одной и той же

номинации: вторая премия в области физики была присуждена ему в 1972 году за создание теории сверхпроводимости.

Ну а само название - «транзистор» придумал их коллега Джон Пирс (John R. Pierce). В мае 1948 года он победил во внутреннем конкурсе, организованном среди сотрудников лаборатории, на самое удачное название изобретения, которому на тот момент исполнилось всего несколько месяцев. Слово «transistor» образовано путем соединения двух терминов: «**transconductance**» (активная межэлектродная проводимость) и «**variable resistor**» или «**varistor**» (переменное сопротивление, варистор).

Первыми, кто стал активно применять транзисторы, были радиолюбители, использовавшие эти элементарные приборы для усиления сигнала. Именно поэтому первые портативные беспроводные радиоприемники пятидесятых годов назывались транзисторными, или даже просто - «транзисторами». Однако со временем они стали использоваться в основном как элементы интегральных микросхем, что обеспечило транзистору важнейшую роль в технических достижениях человечества на протяжении последних сорока лет.



Интересно отметить, что транзистор, по существу, делает то же, что и обычный выключатель: включает и выключает ток. Положение *включено* для транзистора означает «1», положение *выключено* – «0». Огромное количество транзисторов интегральной микросхемы генерирует единицы и нули, которые складываются в понятный компьютеру бинарный код – «язык», который компьютеры используют в процессе вычислений, обработки текста, воспроизведения фильмов и аудио, демонстрации изображений...

Транзисторы и... рок'н'ролл

Первый транзистор, ток в котором тек вдоль поверхности полупроводника, использовался для усиления проходившего через него электрического сигнала - транзисторы справлялись с этой задачей эффективнее, чем популярные в то время, но более громоздкие и хрупкие электронные лампы.

Чтобы максимально ускорить популяризацию транзисторов, в научно-исследовательском центре Bell Labs было принято решение продать лицензию на транзисторные технологии. Лицензию стоимостью 25000 долларов США приобрели двадцать шесть компаний. Однако для коммерческого успеха транзисторных технологий нужно было привлечь внимание массовой аудитории. Это стало возможным благодаря транзисторным радиоприемникам. Первая модель такого устройства, содержащая аж четыре транзистора, была представлена в октябре 1954 года. С появлением портативного радиоприемника радиоманы обрели возможность слушать музыку и получать информацию в любом месте – этим сразу же воспользовалась молодежь, получившая возможность вырваться из-под родительской опеки и самоутвердиться с помощью новой субкультуры. Так портативное радио стимулировало новую революцию... и в музыке – в эфире повсеместно зазвучал рок-н-ролл!

Интегральная микросхема

К концу 50-х годов транзистор «обосновался» в радиоприемниках, телефонах и ЭВМ, и хотя его размеры были намного меньше, чем у электронных ламп, для создания нового поколения электронных устройств этого было явно недостаточно. Чтобы реализовать огромный вычислительный потенциал транзисторов, приспособить их для массового производства и снизить стоимость, потребовалось еще одно изобретение.



В 1958 году Джек Килби (Jack Kilby) из компании Texas Instruments и Роберт Нойс (Robert Noyce) из компании Fairchild Semiconductor, ставший впоследствии одним из отцов-основателей корпорации Intel, изобрели способ объединения большого числа полупроводниковых транзисторов в одну интегральную схему, или микросхему. Это был гигантский шаг вперед – ведь прежде отдельные компоненты электрической схемы приходилось соединять вручную.

У микросхем было два преимущества: более низкая стоимость и более высокая производительность. Оба преимущества явились следствием миниатюризации, которая

обеспечивала экспоненциальное сокращение размеров устройств и необычайную динамичность производственного процесса. Гордон Мур (Gordon Moore), который в 1968 году вместе с Нойсом основал процессорный гигант Intel, в одной из журнальных статей сформулировал прогноз, опубликованный в 1965 году и получивший название «закон Мура». Согласно этому закону число транзисторов в микросхеме должно было удваиваться каждые полтора-два года, что в свою очередь обеспечивало бы повышение вычислительной мощности и снижение конечной стоимости продукта при его массовом производстве. Возможность размещения множества компактных элементов на поверхности малого размера оказалась решающим фактором для успешного продвижения микросхем.

Производителям микросхем удается поддерживать этот экспоненциальный рост плотности размещения транзисторов в микросхеме на протяжении десятков лет. Первый компьютерный микропроцессор корпорации Intel® 4004, выпущенный в 1971 году, содержал 2300 транзисторов. В 1989 году в процессоре Intel® 486 их было уже 1 200 000, а в 2000 году процессор Intel® Pentium® 4 преодолел рубеж в 42 миллиона. Новый четырехъядерный процессор Intel® Core™ 2 Extreme, созданный на базе 45-нанометровой производственной технологии, содержит 820 миллионов транзисторов.

Игры атомов

Закону Мура постоянно предсказывают кончину. Бесконечный экспоненциальный рост невозможен по определению – и все-таки производителям процессоров до сих пор удается обходить ограничение. В сентябре прошлого года Гордон Мур заявил, что у закона его имени есть все шансы оставаться в силе еще как минимум лет 10-15, но затем могут возникнуть новые фундаментальные барьеры на пути его реализации. Так или иначе, но этот самый известный закон компьютерного мира XXI века ждали трудные времена.

Битва за миниатюризацию исчерпала возможности одного из наиболее критических компонентов транзистора: прослойки из диоксида кремния (SiO_2), служившей изолирующим слоем между затвором транзистора и его каналом, по которому течет ток, когда транзистор включен. С каждым новым поколением



процессоров этот изолирующий слой становился все более тонким – пока два поколения назад его толщина не достигла значения $1,2 \text{ нм}^1$, или 5 атомов. Инженеры Intel уже не смогли сделать этот слой тоньше хотя бы еще на один атом.

По мере уменьшения толщины изолирующего слоя рос ток утечки. Изолирующий слой начал пропускать ток внутрь транзистора, поведение устройства изменилось, оно стало рассеивать все большее количество энергии. В результате выросло потребление тока процессором, при его работе выделялось дополнительное количество теплоты.

Фундаментальный предел

Утечка тока в транзисторе стала серьезнейшей проблемой полупроводниковой отрасли: без прорыва в этой области давно предсказанный фундаментальный предел становился непреодолимым. Причем, это означало не только конец закона Мура – цифровая революция последних десятилетий внезапно бы прекратилась. Компьютерные процессоры, практически удваивавшие свою производительность каждые 24 месяца, могли кануть в Лету.

Чтобы найти выход из кризиса, нужно было увеличить толщину изолирующего слоя, но изготавливать этот более толстый слой из другого диэлектрического материала с более высоким коэффициентом диэлектрической проницаемости (high-k) для сохранения характера взаимодействия затвора и канала. В январе 2007 года корпорация Intel объявила, что впервые за сорок лет изолирующий слой будет состоять не из оксида кремния, а из материала на основе гафния, серебристо-серого металла, превосходящего кремний по электрическим свойствам и позволяющего снизить ток утечки в десять раз. Сам Гордон Мур назвал это крупное достижение «самым важным изменением транзисторных технологий с конца шестидесятых годов».

Однако данный прорыв решал проблему лишь наполовину. Новый материал оказался несовместимым с важным компонентом транзистора – с затвором. Еще хуже то, что транзисторы с новым изолирующим материалом работали менее эффективно, чем со старым. Тогда было предложено заменить и материал затвора: корпорация Intel открыла уникальное сочетание металлов, состав которого держится в строгом секрете.

¹ Нанометр (нм) – это миллиардная доля метра

12 ноября 2007 года корпорация Intel представила новое поколение процессоров на основе этих материалов и 45-нанометровой производственной технологии. Новая производственная технология, более тонкая, чем предыдущая 65-нанометровая, позволила Intel почти вдвое увеличить число транзисторов, размещаемых на той же площади кристалла – теперь можно было выбирать между увеличением общего числа транзисторов и уменьшением размеров процессора. Новым транзисторам требуется на 30% меньше энергии для включения и выключения. В итоге новое поколение процессоров Intel, изготовленных по 45-нанометровой производственной технологии, не только демонстрирует рекордную производительность, но и знаменует прорыв в области энергопотребления.



Повышение вычислительной мощности, являющееся следствием закона Мура, позволяет человечеству эффективнее просчитывать пути разрешения важнейших стоящих перед ним проблем: изменение климата, наследственные болезни, тайны генетики и др. Современные пути и темпы решения подобных проблем еще пять лет назад трудно было себе даже представить.

Новые приложения помогают изменить нашу жизнь и сделать ее еще более безопасной...

Количество транзисторов в процессоре:

Intel® 4004	1971	2300
Intel® 8086	1978	29 000
Intel® 486	1989	1 200 000
Intel® Pentium® III	1999	9 500 000
Intel® Pentium® 4	2000	42 000 000
Intel® Core™ 2 Duo	2007	410 000 000

Процессоры и производственная технология:

1993	Intel® Pentium®	800 нм
1999	Intel® Pentium® III	250 нм
2002	Intel® Pentium® 4	130 нм
2005	Intel® Pentium® D	90 нм
2006	Intel® Core™ 2 Duo	65 нм
2007	Intel® Core™ 2 Duo	45 нм

Корпорация Intel, ведущий мировой производитель инновационных полупроводниковых компонентов, разрабатывает технологии, продукцию и инициативы, направленные на постоянное повышение качества жизни людей и совершенствование методов их работы. Дополнительную информацию о корпорации Intel можно найти на Web-сайте www.intel.com/pressroom, на

русскоязычном Web-сервере компании Intel (<http://www.intel.ru>), а также на сайте <http://blogs.intel.com>.

Intel и логотип Intel являются товарными знаками корпорации Intel в США и других странах.

*Другие наименования и товарные знаки являются собственностью своих законных владельцев.