

Intel от нанотехнологий и до 2011 года: кремний не выдержит

Станислав Васильев, Константин Серебряков, Дмитрий Чеканов, 25 ноября 2003

Закон Мура гласит:

Будущее уже рядом. Оно всего в одном шаге впереди, и сквозь туман коммерческих тайн и неопределённость секретных технологических процессов нам иногда видятся смутные очертания некоторых перспектив. Когда за спиной маячит стабильный фундамент инженерных наработок и большой запас прочности, компания может позволить себе рассказать, что нового в "транзисторостроении" стоит ожидать в ближайшие годы, не рискуя выдать конкурентам ключи от завода, где деньги куют. Вице-президент подразделения Corporate Technology Group корпорации Intel Фрэнк Спиндлер и директор по архитектуре и интеграции производства подразделения Technology and Manufacturing Group Марк Бор поведали нам массу интересной информации, который мы решили поделиться с вами. Это касается технологий High-K, новых диэлектрических материалов и планов Intel до 2011 года.

Услышали мы что-то новое? Хороший вопрос... В ленте новостей за ноябрь уже промелькнуло кое-что, о чём мы не узнали, хотя и ожидали этого... Если вы следили за лентой, то, должно быть, уже это знаете, если нет, то в этом материале мы ничего лишнего не расскажем - он основан сугубо на публичной информации. Вчера вечером в офисе Intel мы принимали участие в конференц-звонке по региону EMEA, приуроченному к выпуску первых модулей памяти SRAM по технологии 65 нанометров. Следующий год пройдёт под знаком ввода в массовое производство потоковых линий для выпуска процессоров по 90 нм технологии, а 65 нм начнут реализовываться ещё через год, ближе к 2005 и на 300 миллиметровых подложках. Позднее, к 2007 году, произойдёт переход на 45 нм.

Вместе с тем, существует ряд проблем с литографическим оборудованием или, так называемыми, степперами, которые местами могут затормозить переход. В данном материале мы вкратце постараемся обрисовать технологии и процессы, которые Intel будет использовать до 2011 года. Дать более глубокий прогноз сегодня практически невозможно...

Возможно ли ещё на десять лет продлить действие закона Мура и как это сделать? Если говорить не только о литографии, но и о "политических" технологиях, то важным средством для продления действия закона Мура Intel считает капитальные вложения в R&D (научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы) даже в те годы, когда индустрия находится в упадке. В частности, в этом году Intel увеличила вложения в R&D до \$3,5 миллиардов, что является рекордным результатом за все годы, с самого момента существования компании. Процесс разработки ускоряется, и, по данным статистики, это происходит даже в те годы, когда условия на рынке кажутся далеко не идеальными, думаем, и в будущем тенденции сохранятся.

Итог мы видим - компьютеры стоимостью менее 1000 долларов сегодня демонстрируют производительность, которой не могли похвастаться громадные мейнфреймы прошлого, а через двадцать лет в сотовом телефоне будет сконцентрирована мощь, при помощи которой сегодня проводятся вычисления физических процессов, происходящих при

ядерных взрывах. Не многовато ли? Нужна ли нам такая вычислительная мощность?

Вместе с процессорами эволюционирует модель использования компьютера, появляются новые средства, цели и задачи. Процессорной мощности не может быть много, это аксиома, мощность всегда можно потратить так, что потребуется ещё больше производительности. Процесс эволюции электроники это не только красивые слова и общие фразы - сложно уместить кита в трёхлитровую банку, и не менее сложно упаковать транзисторы в компактный процессор. В своё время nVidia рискнула заявить, что будет стабильно придерживаться политики вывода на рынок новых чипов каждые 6 месяцев, и это звучало убедительно, однако затем технологический процесс взбунтовался, и вы помните, как это сказало на ситуации на рынке. Рисовать транзисторы на подложке, это не кирпичи в стену укладывать. Процесс весьма наукоёмкий, непростой и требующий всё больших капиталовложений.

Позволим себе напомнить, что суть закона Мура заключается в том, что число транзисторов на кристалле микропроцессора удваивается примерно каждые два года. К нынешнему моменту технологии подошли к той черте, когда уже проблематично придерживаться прежней динамики уплотнения транзисторов ввиду очевидных физических ограничений - толщина диоксидной плёнки транзистора приблизилась к 1 нанометру, и дальнейшее уменьшение размеров при сохранении нынешних технологий приведёт к заметному росту токов утечки и, как следствие, к снижению эффективности и производительности транзисторов. Это не значит, что уже следующий процессор придётся выпускать по новой технологии - до 2007 года хватит существующих транзисторов. А начиная с 2007?

Один нанометр, это около 5 атомарных слоев, то есть слой диэлектрика в процессоре составляет 5 (!) атомов. По оценкам экспертов корпорации Intel, в современных чипах уже почти 40% энергии теряется из-за утечек, что негативным образом сказывается на производительности, температурном режиме, возможностях увеличения производительности и частоты.

Динамика роста количества кристаллов сегодня сохраняется не только за счёт роста транзисторов в основном процессорном ядре, но и за счёт дополнения его огромным количеством кэша, что для процессоров, существовавших во времена, когда Гордон Мур впервые публично озвучил своё наблюдение, было нехарактерно. Помните, как недавно мы писали о том, что в 2005 году выйдет ядро Montecito, на котором будет интегрировано целых 24 мегабайта кэша третьего уровня. Несложно представить, сколько транзисторов будет на это "потрачено". В будущем, помимо кэша, в процессоры могут быть интегрированы другие элементы, например, беспроводная часть, известная сегодня под концепт-названием Radio Free Intel. В ближайшие годы Intel планирует начать массовое производство чипов, в которых будет интегрировано не одно, а несколько ядер (4 и более), что позволит физически эмулировать средствами одного процессора целых 4, а затем 8, 16... и более чипов. В такой ситуации на первое место выйдет вопрос качества оптимизации прикладных программ под многозадачность и многопоточность. Но, до этого ещё нужно "дожить", а пока на повестке дня вопрос - как же Intel планирует и далее уменьшать транзисторы, какие технологии и вещества использовать?

Об этом нам поведал вице-президент корпорации Intel, [директор](#) группы корпоративных технологий Фрэнк Спиндлер, который работает в Intel с 1982 года и сейчас курирует программы развития промышленных технологий. Но даже он не может дать прогноз больше чем на десять лет вперёд. Фрэнк вспоминал, что как раз в 1982 году, когда он только пришёл работать в Intel и в первый же день посетил технологический семинар, кто-

то задал аналогичный вопрос. Ответ с тех пор мало эволюционировал - "закон Мура будет действовать ещё лет десять". С тех пор прошло более 20 лет, и технологии вносят свои коррективы. Рисковать предсказывать будущее более, чем на декаду, не может себе позволить даже такой технологический лидер, как Intel. Но на ближайшие 8 лет мы прогнозировали:

Процесс	P856	P858	Px60	P1262	P1264	P1266	P1268	P1270
Ввод в производство	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011
Техпроцесс	0,25 мкм	0,18 мкм	0,13 мкм	90 нм	65 нм	45 нм	32 нм	22 нм
Размер пластины (мм)	200	200	200/300	300	300	300	300	300
Соединения	Al	Al	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	?
Канал	Si	Si	Si	раст. Si	раст. Si	раст. Si	раст. Si	раст. Si
Диэлектрик затвора	SiO ₂	High-k	High-k	High-k				
Материал затвора	Поликр. кремний	Металл	Металл	Металл				


Может измениться

Вместе с улучшением технологических процессов Intel наращивает темпы ввода лабораторных процессов в коммерческую эксплуатацию. Если раньше это занимало около 3 лет, то теперь срок сокращён до двух лет. Мы находимся в том месте, которое обведено в таблице красным кружочком. Соответственно, процессор 2011 года будет выполнен с использованием 22-нанометровой литографии на подложках диаметром 300 мм, будет использовать "напряжённый" (или как ещё говорят "растянутый" - strained) кремний, High-K диэлектрики и металлизированный затвор в транзисторах. Но 2011 далеко, и у нас куда больше данных по процессорам 2005 года. Сейчас известно, что на них не будет использоваться новый материал диэлектрика затвора, но будет реализовано второе поколение технологии "напряжённого кремния", и для их производства подойдёт существующее литографическое оборудование с длиной волны 193 нм. Пилотное производство этих чипов будет проходить на фабрике D1D в Хиллсборо. Подробности ниже.

:что мир уже шагнул в эпоху нанотехнологий...

Нанотехнологии, это не только миниатюрные роботы в крови человека, это не создание любого вещества из атомов и не полная кибернетизация окружающего пространства. Мы уже вступили в век микроразмеров и макропроблем, с этим связанных. Технологические процессы, которые Intel вводит на производственных линиях, позволили опустить размеры транзисторов ниже черты в 100 нанометров - уже к концу этого года Intel переводит свои продукты на 90-нанометровый процесс производства и 300 мм подложки. От размера подложки зависит немало - ведь при окончательном налаживании процесса производства больший размер пластины автоматически означает большее количество "нарезанных" с пластины годных процессоров, что, в свою очередь, означает снижение себестоимости производства. Вы ведь хотите, чтобы процессоры становились дешевле? Наряду с этим, происходит процедура модификации производственного оборудования и самого процесса производства - например, недавно Intel перешла на использование в канальных материалах

транзисторов медных соединений и К-материалов с большим диэлектрическим коэффициентом.

Если вы не слишком знакомы с полупроводниковыми технологиями, позволим себе провести небольшой экскурс. Транзистор - это просто выключатель, при помощи которого включается и выключается цепь.



Транзистор состоит из следующих элементов:

- Электрода затвора
- Диэлектрика затвора
- Истока
- Канала
- Стока
- Подложки из кристаллического кремния

Текущий поток от истока к стоку определяется тем, какое - высокое или низкое - напряжение подается на затвор. Это состояние подобно положению выключателя сети освещения (включено или выключено), которое определяет, подается электрический ток на лампу или нет. Микросхемы, такие как микропроцессоры, состоят из миллионов транзисторов, определенным образом связанных вместе медными проводниками. Цель развития технологии - сделать эти транзисторы меньше, снизить их энергопотребление. Достижение этой цели приведет к созданию более мощных микросхем.

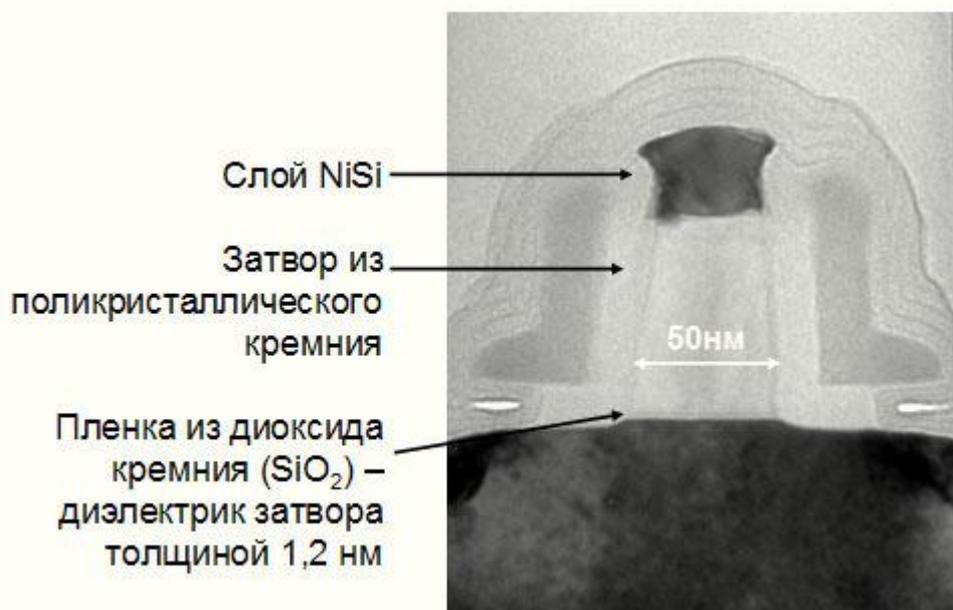
Важный элемент транзистора - это затвор (область в верхней части транзистора), на который подается потенциал, и который определяет, выключен или включен транзистор. Традиционно затвор изготавливается из поликристаллического кремния, т. е. атомы кремния расположены случайным образом, а не как в пространственной решетке.

В описании конструкции транзистора используются также такие термины как "исток" и "сток", между которыми протекает ток через канал, посредством канального материала.

Еще один важный компонент - это изолирующий слой, так называемый "диэлектрик затвора", который предотвращает протекание тока в ненужном направлении и позволяет обеспечить протекание только от истока к стоку. Проблема заключается в том, что уменьшение размера транзисторов ведет к утончению изолирующего слоя (до 5 атомарных слоев сегодня), и, как следствие, к возникновению сильного тока утечки. Сильный ток утечки, в свою очередь, ведет к росту потребляемой мощности, снижению быстродействия транзистора и другим побочным эффектам.

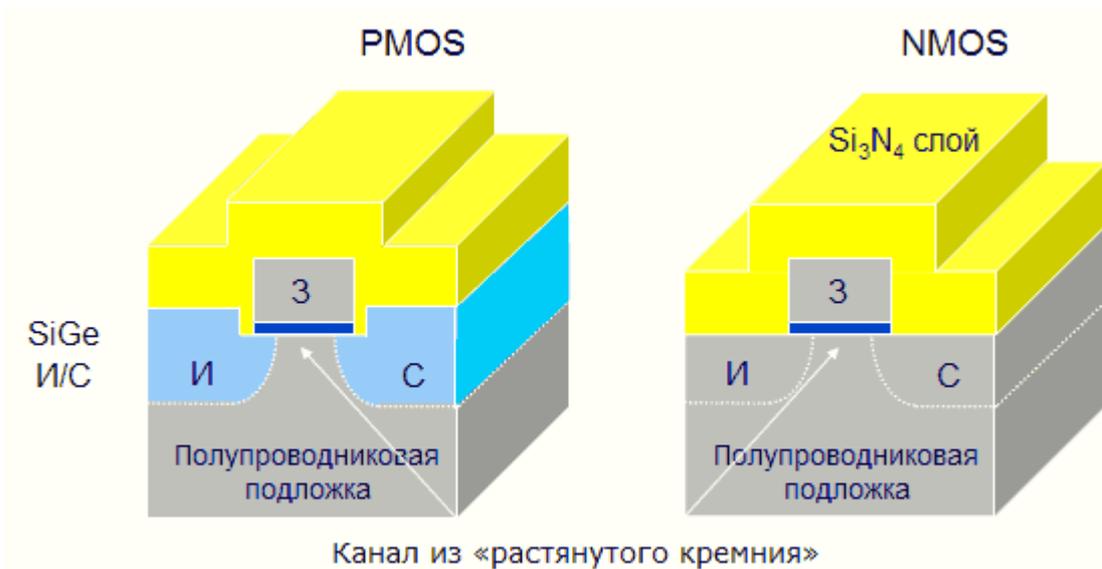
На протяжении тридцати лет для формирования диэлектрика затвора использовался диоксид кремния, но к сегодняшнему дню его "запас прочности" подходит к концу. Толщина слоя диэлектрика приблизилась к 1 нанометру, что вполне сопоставимо по размерам с атомарным слоем, и диоксид кремния уже не может сдерживать те потоки электроэнергии, которые потребуются для работы будущих процессоров.

Диоксид кремния, это материал, молекулы которого состоят из одного атома кремния и двух атомов кислорода. Наличие тонкого слоя диоксида необходимо для достижения высоких эксплуатационных характеристик диэлектрика затвора. Intel считает, что дальнейшее использование диоксида кремния приведёт к избыточному тепловыделению и неразрешимым проблемам инженерного характера. В частности, в современном процессоре уже до 40% потребляемой энергии уходит именно на токи утечки. Следовательно, необходимо заменить диоксид кремния новыми материалами, обладающими теми же свойствами, использование которых не потребует достижения низкой толщины слоя.



Так выглядит транзистор, изготовленный по проектным нормам 90 нм

На иллюстрации вы видите реальный снимок сечения транзистора. Здесь мы видим, в частности, затвор, изолирующий слой и канальную область внизу. Размер затвора уже приблизился к 50 нанометрам и в дальнейшем продолжит уменьшаться.

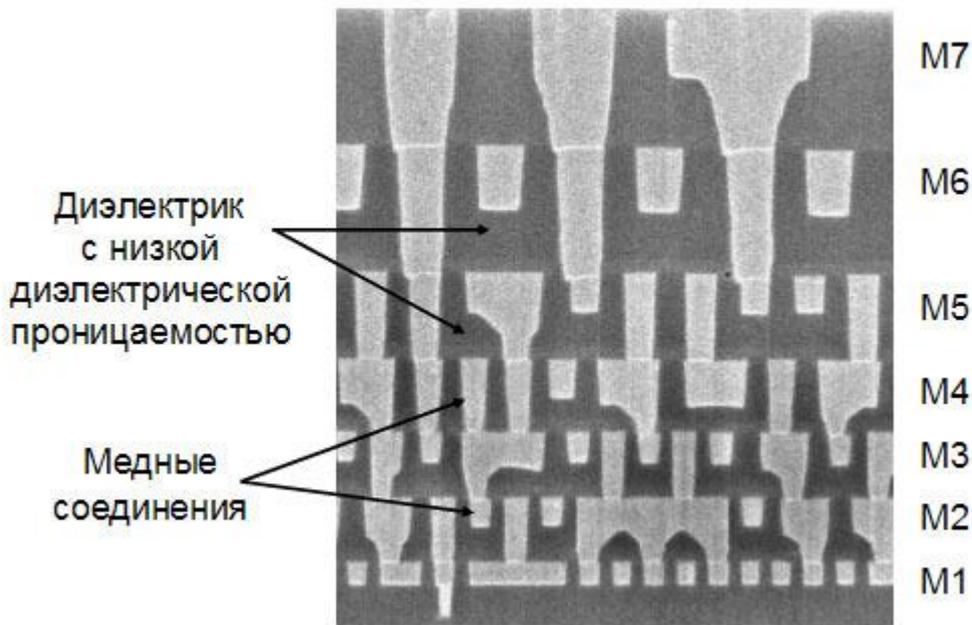


Технология растянутого кремния для транзисторов p- и n-типа.

Технология "напряжённого" или как его ещё называют "растянутого" кремния (strained silicon) была создана несколько лет назад. В канальном материале имеется кремниевая решётка, и если её растянуть, "насадив" на материал с большим расстоянием между атомами, то можно заметно уменьшить сопротивление канальной области, и, как следствие, увеличить плотность тока в ней. В процессе производства чипов по технологии 90 нанометров уже используется "напряжённый" кремний. Обычно атомы кремния в канале упакованы в упорядоченную пространственную решётку. Известно, что создание в пространственной решётке таких напряжений, чтобы атомы кремния находились друг от друга на расстоянии чуть больше, чем их естественное расстояние, приводит к ускорению переключений транзисторов типа NMOS (так же как сжатие пространственной решётки приводит к такому же эффекту для транзисторов типа PMOS). Это растяжение/сжатие известно как напряжение. Корпорация Intel использует специальную технику создания напряжений при изготовлении транзисторов NMOS и PMOS по 90-нанометровой технологии для улучшения их эксплуатационных характеристик.

Транзисторы бывают NMOS и PMOS типа. В NMOS имеется поверхностный слой, который позволяет атомам растягиваться в решётке, а в PMOS можно за счёт повышения плотности увеличивать плотность тока. В настоящий момент задачу улучшения характеристик транзистора позволяет решить кремний-германиевая (SiGe) подложка. Благодаря ей, Intel уже удалось сделать транзистор p-типа, который обладает на 25 процентов более высоким током внутри транзистора, и, грубо говоря, на четверть быстрее работает. Другой способ сделать процессор быстрее - использовать нитрид кремния (Si_3N_4) в качестве материала слоя покрытия, что увеличивает рабочий ток канала на 10% в транзисторах n-типа. Усложнение процесса производства и применение растянутого кремния приводит к росту себестоимости чипа всего на 2%, и наряду с этим, даёт возможность совершить эволюционный шаг вперёд в уменьшении размеров транзисторов...

Что касается достижений компании в области миниатюризации транзисторов, то Intel уже изготовила статическую память SRAM с ячейкой площадью в 1 квадратный микрон, перешла на 300 мм подложки и улучшила процесс производства, благодаря использованию меди для соединений участков процессора (на снимке ниже), что позволило достичь низких ёмкостных величин и улучшить качество.

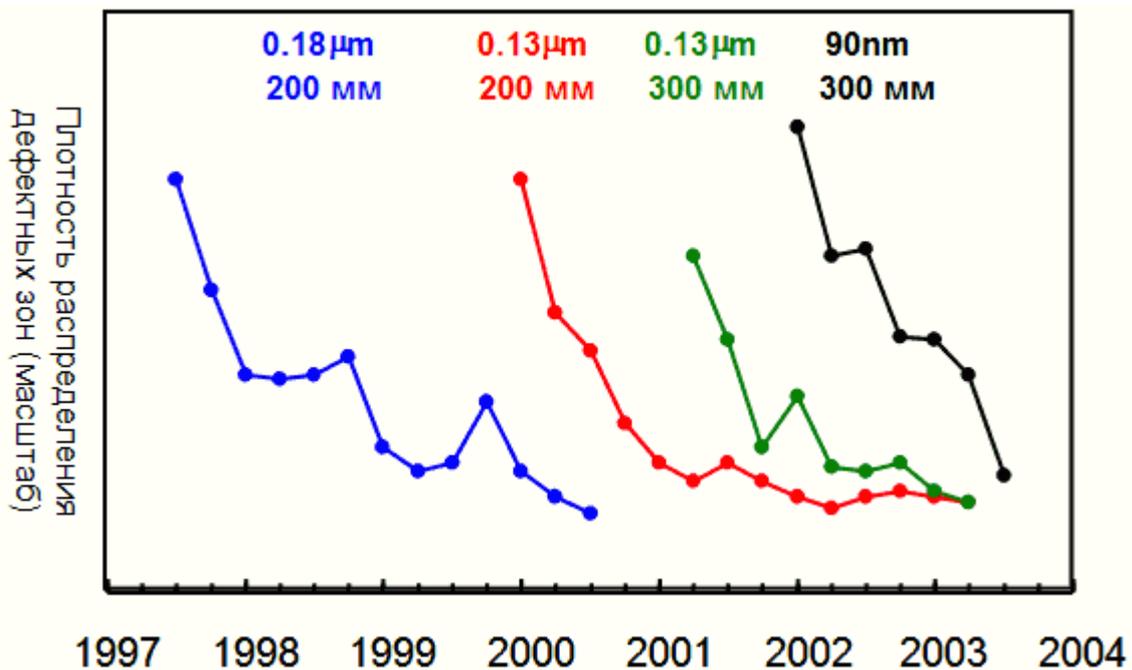


Семь слоёв медных соединений.



6 транзисторов на площади в 1 квадратный микрон

Важным вопросом при массовом производстве любого товара является процент выхода годной продукции (yield). Коммерческий выпуск процессоров начинается именно тогда, когда удаётся достигнуть минимального выхода дефектных ядер с одной подложки, и, тем самым, ещё более снизить себестоимость производства. Мы не сомневаемся, что и сейчас возможно в лабораторных условиях получить десятигигагерцовый процессор, но дело в том, что обеспечить сколько-нибудь разумный выход годных чипов с одной подложки не получится. Каждый такой чип будет стоить гораздо дороже чистого золота, и его производство будет, прежде всего, экономически нецелесообразным.



Тенденции повышения продуктивности процессоров Intel

Несмотря на то, что около полугода западные сайты систематически пишут о проблемах введения в строй 90-нанометровой технологии, Intel утверждает, что с её коммерческим введением кривая выхода годных чипов круто пошла вверх, то есть дефектных чипов стало выходить гораздо меньше, чем при работе с более "грубыми" процессами производства. В следующем году на 90-нанометровом процессе будут производиться процессоры с ядром Prescott для настольных ПК и Dothan для ноутбуков (такое лабораторное имя дано будущему Pentium-M/Centrino). Полное внедрение 90-нанометровой технологии произойдёт в 2004 году на фабриках Intel D1C в Хиллсборо (США, Орегон), в Intel 11X в Рио-Ранчо (США, Нью-Мексико) и в Fab24 в Лейкслипе (Ирландия). И если первые два завода уже работают, то производство в Ирландии будет запущено только в первой половине 2004.

...но есть угроза: несовместимость High-K диэлектриков с кремнием

В какой-то момент развития микропроцессоров возникла прямая угроза невозможности дальнейшего соблюдения закона Мура. Для Intel это, в каком-то смысле, знаковый закон, своего рода корпоративная легенда, следование которому является важным моментом, в том числе, и для внутренней психологии компании. Впервые за тридцать лет компания столкнулась с ситуацией, когда запас прочности диоксида кремния оказался недостаточным для создания процессоров будущего. Проблема в том, что слой кремниевого диоксида по мере того, как он делается тоньше, начинает пропускать токи, то есть появляется паразитный ток утечки. Когда Фрэнк Спиндлер работал в группе мобильных платформ, он занимался, в том числе, токами утечки, и ему доводилось наблюдать случаи, когда ток утечки составлял большую часть энергопотребления транзистора, а это убивало все преимущества чипа - при такой потере энергии теряется всё, в том числе скорость и производительность. Это влияет и на время автономной работы техники, и на эффективность работы с батареей. У процессоров с большим током утечки возникали проблемы избыточного тепловыделения и нагревания, а это, как вы знаете, очень серьёзная проблема для всей отрасли.

Процесс	P856	P858	Px60	P1262	P1264	P1266	P1268	P1270
Ввод в производство	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011
Техпроцесс	0,25 мкм	0,18 мкм	0,13 мкм	90 нм	65 нм	45 нм	32 нм	22 нм
Размер пластины (мм)	200	200	200/300	300	300	300	300	300
Соединения	Al	Al	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	?
Канал	Si	Si	Si	раст. Si	раст. Si	раст. Si	раст. Si	раст. Si
Диэлектрик затвора	SiO ₂	High-k	High-k	High-k				
Материал затвора	Поликр. кремний	Металл	Металл	Металл				

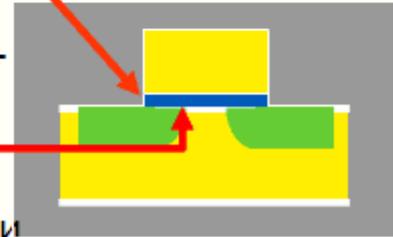
Внедрение планируется в это время **Может измениться**

К 2007 году будет начато производство транзисторов с металлическим материалом затвора и High-K материалом диэлектрика по производственным нормам 45 нм

На замену диоксиду кремния в качестве материала изолирующего слоя затвора придёт материал, который сможет обеспечить более толстый слой изолятора и будет, в то же время, иметь высокую диэлектрическую проницаемость. Такой материал уже найден, и он получил название "High-K диэлектрика". Благодаря использованию нового материала, ток сможет быстро начать проходить по каналу после приложения напряжения к затвору, то есть скорость срабатывания транзистора увеличится.

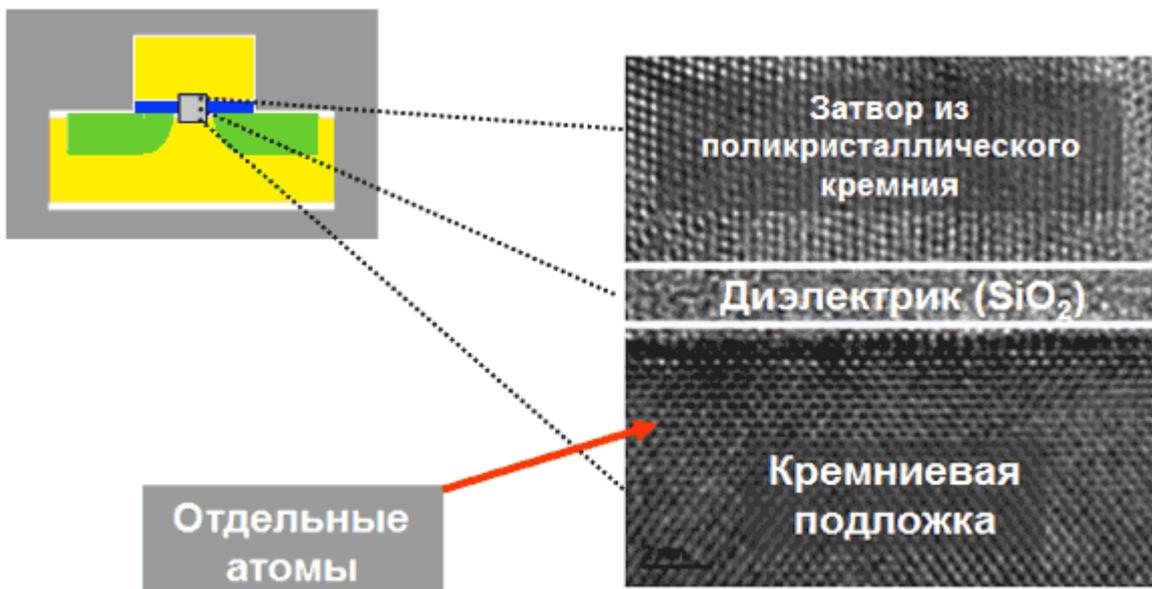
Intel надеется внедрить High-K диэлектрики в производство к 2007 году. Материал, который заменит диоксид кремния при изготовлении электрода затвора, обладает хорошими изолирующими свойствами, а также создает хорошее ёмкостное сопротивление между затвором и каналом. Оба этих свойства желательны для достижения высоких эксплуатационных характеристик транзисторов. Буква "к" (фактически греческая буква "каппа") указывает на способность материала сохранять электрический заряд. Для того, чтобы лучше понять процесс, представьте губку. Она может впитать много воды. Дерево тоже может впитать некоторое количество воды, но не так много, как губка. Стекло вообще не может впитывать воду. Подобно этому, некоторые материалы могут хранить электрический заряд лучше, чем другие, т. е. обладают высокой величиной "к". Применение материалов на основе технологии high-k значительно уменьшает утечки, т. к. эти материалы могут иметь большую толщину, чем диоксид кремния, при сохранении тех же свойств.

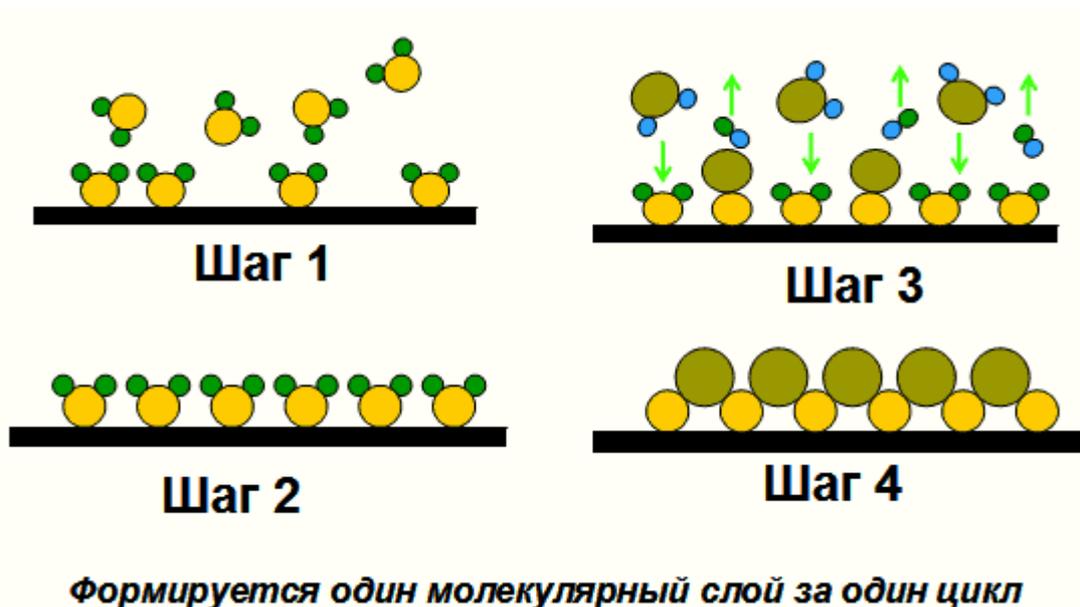
1. После 5 лет исследований Intel разработала материал high-k для использования в качестве диэлектрика затвора
2. Также Intel разработала металлический затвор для транзисторов NMOS- и PMOS-типа, с которым совместим новый диэлектрик
3. Intel разработала технологию интеграции новых материалов и достигла рекордной производительности транзисторов при максимальном уменьшении токов утечки
4. Intel полагает, что комбинированная технология high-k/металлический затвор может быть внедрена в 45-нм производственный процесс, который планируется запустить в 2007 году



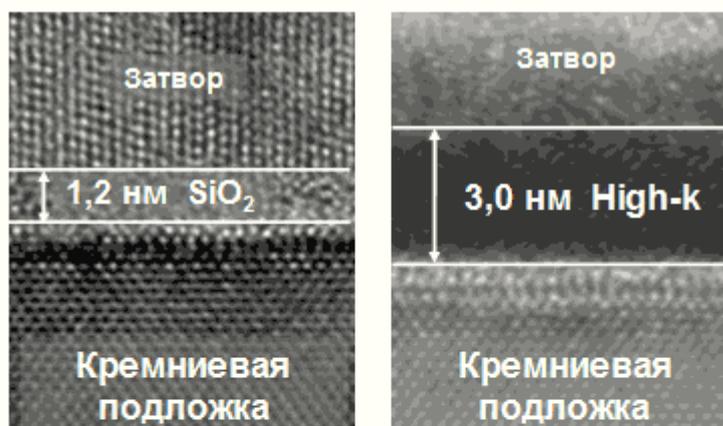
Утечки - поток, проходящий через диэлектрик затвора. В идеальном случае диэлектрик затвора действует как совершенный изолятор. Но поскольку этот слой сделан очень тонким, через него происходят утечки. Транзистор потребляет большее количество мощности, чем необходимо, поскольку его эксплуатационные характеристики нарушаются.

У High-K материала ёмкостное сопротивление на 60 процентов больше, чем у диоксида кремния, а ток утечки уменьшается в 100 раз (!). Это очень серьёзное достижение, поскольку, по мнению Фрэнка Спиндлера, оно снимает барьер для развития закона Мура, позволяя снизить как энергопотребление, так и тепловыделение процессора. Но просто заменить материал диэлектрика недостаточно - для формирования затвора в процессорах используются кремниевые материалы, а новый материал диэлектрика с показателем "хай кей" плохо взаимодействует с этими материалами.





В ходе разработки обнаружались проблемы с мобильностью электронов и обеспечением электротока. Intel необходимо было найти новый материал, некий металлический сплав, который хорошо комбинируется с материалом затвора и вместе с ним даёт высокую скорость транзистора. Какие именно материалы обнаружили учёные в Intel, сказано не было, просто для того, чтобы не раскрывать секреты конкурентам.



Преимущества по сравнению с современной технологией:

	High-k vs. SiO ₂	Преимущество
Емкостное сопротивление	На 60% больше	<i>Повышается быстродействие</i>
Ток утечки	> В 100 раз меньше	<i>Уменьшается тепловыделение</i>

На слайде ниже вы видите параметры, которые достигаются при помощи High-K диэлектрика. Рабочий ток внутри выключенного транзистора низкий - видно, как меняется кривая при включении транзистора. Фрэнк Спиндлер просил отметить, что кремний будет базовым компонентом ещё много лет, но, вероятно, возникнут и новые возможности, например, станут доступными для использования новые материалы, которые будут

интегрироваться тем или иным образом с кремнием - например, углеродистые составы.

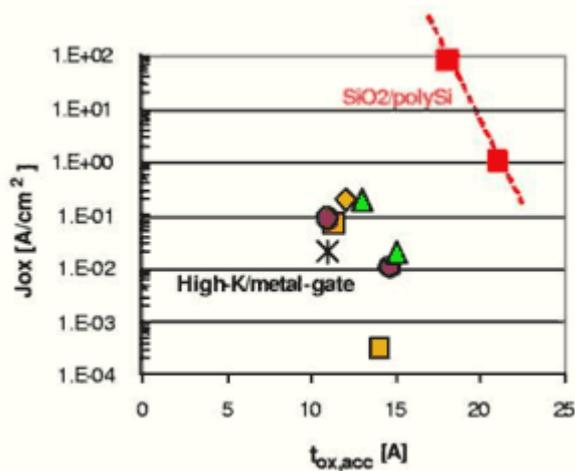


В процессорах используются различные типы транзисторов. Например, транзистор NMOS (так называемый транзистор n-типа) включён, когда на затворе высокое напряжение и выключен, когда низкое, а транзистор PMOS (так называемый транзистор p-типа) имеет противоположный принцип действия, то есть транзистор выключен, когда на затворе высокое напряжение и включён, когда низкое. Для производства процессоров, как впрочем и всех современных логических микросхем, используется технологический процесс CMOS. Еще один термин, использующийся при описании процессов производства и характеристик процессоров, это пороговое напряжение - уровень напряжения между высоким и низким, по которому определяется, является ли транзистор выключенным или включённым. Для транзистора NMOS, если на затворе напряжение выше порогового уровня, транзистор "включён", если ниже - "выключен". Транзистор PMOS действует по обратному принципу. Транзисторы разрабатываются для использования при низком пороговом напряжении, так как это приводит к достижению высоких эксплуатационных характеристик.

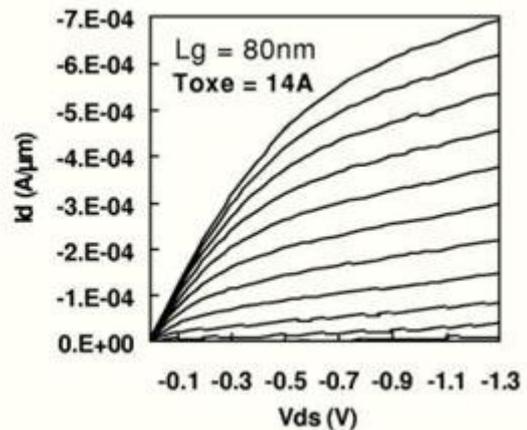
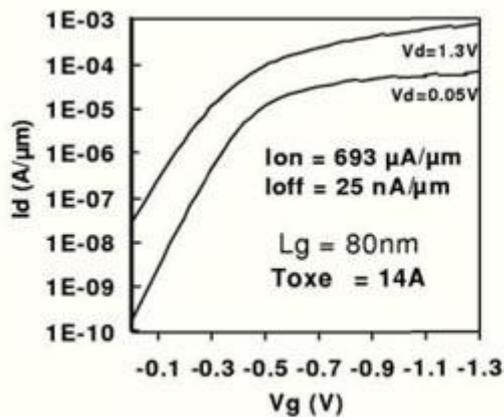
Важной характеристикой транзистора является превышение порогового напряжения (известное также как превышение границы Ферми) - при совместном использовании диэлектрика затвора, изготовленного на основе технологии high-k, и поликремниевого электрода затвора, возникают две проблемы. Из-за некоторых дефектов в области диэлектрика затвора/электрода затвора, становится трудно отрегулировать пороговое напряжение на низком уровне, необходимом для достижения высоких эксплуатационных характеристик. Проблема решается, если электрод затвора изготовлен из материала, отличного от поликремния. Выбор материала различен для транзисторов типов NMOS и PMOS.

В научной литературе отмечалось, что превышение границы Ферми на переходе между слоем, полученным по технологии "high-K", и поликремниевым слоем, приводит к возникновению высокого порогового напряжения в транзисторах MOSFET. Отмечается также, что при эксплуатации транзисторов на основе технологии "high-K/поликремний" наблюдается значительное снижение активности движения электронов через канал из-за возникновения поверхностно-оптического фонового режима (SO) и, связанного с ним, уменьшения энергопотребления, вследствие поляризации слоя "high-K", и инверсии заряда материала канала. В связи с этим, металлический затвор может быть более эффективен

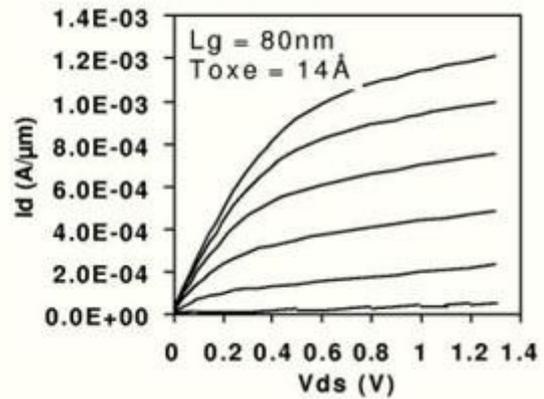
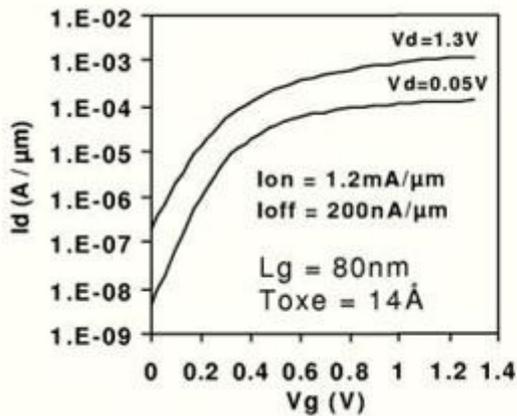
при экранировании фоновых полей "high-K SO", возникающих от присоединения к каналу в условиях инверсии. С другой стороны, для применения технологии "high-K/metal-gate" при изготовлении переходов в транзисторах требуются металлы с заданными эксплуатационными параметрами для получения соответствующих высоких характеристик кремниевых заготовок. В результате, Intel удалось создать высокоэффективные транзисторы PMOS и NMOS со стеками, полученными по технологии "high-K/metal-gate". Транзисторы обладают длиной затвора, равной 80 нанометров, и толщиной слоя оксида, вычисленной путем инвертирования (приблизительно 1,4 нанометров).



На слайде выше показаны сравнительные характеристики утечек тока через стеки, изготовленные по технологии "high-K/metal-gate", и обычные диоксид кремниевые/поликремниевые стеки. На двух слайдах ниже показаны характеристики транзистора типа PMOS, изготовленного по технологии "high-K/metal-gate":



А на следующих двух слайдах характеристики транзистора типа NMOS, изготовленного по той же технологии. Транзисторы обоих типов показывают очень высокую эффективность при установке соответствующего порогового напряжения, и хорошую управляемость характеристик канала, как для p-, так и для n-каналов.



Фоновое рассеяние - второй нежелательный эффект, который возникает при совместном использовании диэлектрика затвора, изготовленного на основе технологии high-k, и поликремниевое затвора. Это явление ограничивает подвижность электронов и, следовательно, снижает эксплуатационные характеристики. Проблема решается путём изготовления затвора по особой технологии из материала, заменяющего поликремний.

Intel удалось добиться использования слоя диоксида кремния толщиной 1,2 нанометра на технологических узлах, работающих по 90-нанометровой технологии, и дальнейшего уменьшения толщины этого слоя до 0,8 нанометров и его интеграции в экспериментальные транзисторы с длиной затвора 15 нанометров, которые показали хорошие характеристики управляемости канала. Также, были успешно представлены возможности транзисторов типа NMOS и PMOS со стеками, изготовленными по технологии "high-K/metal-gate", с корректно отрегулированным уровнем порогового напряжения для p- и n-каналов на кремниевой заготовке. Intel полагает, что технология "high-K/metal-gate" - хороший выбор для узлов, изготавливающих логические микросхемы по 45-нанометровому процессу.

Расширить закон Мура поможет бесплатное радио

Точно так же, как сегодня закону Мура "помогает" ёмкий кэш, в будущем закон "удваивания количества транзисторов", вероятно, можно будет соблюсти только при помощи интеграции в процессор и чипсет радиокомпонентов. Соблюдение закона не цель, а хорошее маркетинговое средство, но, с нашей точки зрения, Radio Free Intel - это не "красивое сочетание слов и бесполезная технология", это то, что перевернёт сами основы взаимодействия компьютера и окружающей среды.

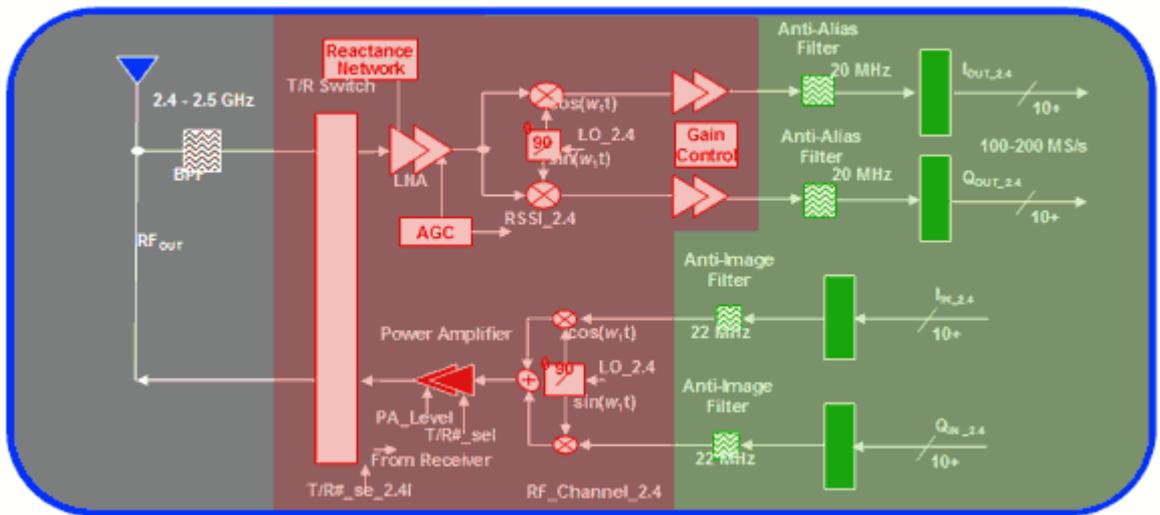
Если посмотреть на то, как радио развивалось с начала 20-го века, то мы увидим, что всего сто лет назад установки для передачи сигнала без проводов были очень крупными, но затем постепенно перемещались в сторону потребительского сегмента, когда ими смогли пользоваться миллионы людей. Сегодня мы, уже не задумываясь, пользуемся мобильной связью, привыкаем к Bluetooth и Wi-Fi. Тем более, что компания Broadcom на проходящем сейчас в Лас-Вегасе Comdex Fall'2003 объявила о выходе нового чипсета для сотовых телефонов, который будет поддерживать связь Wi-Fi.

Универсальный коммуникатор



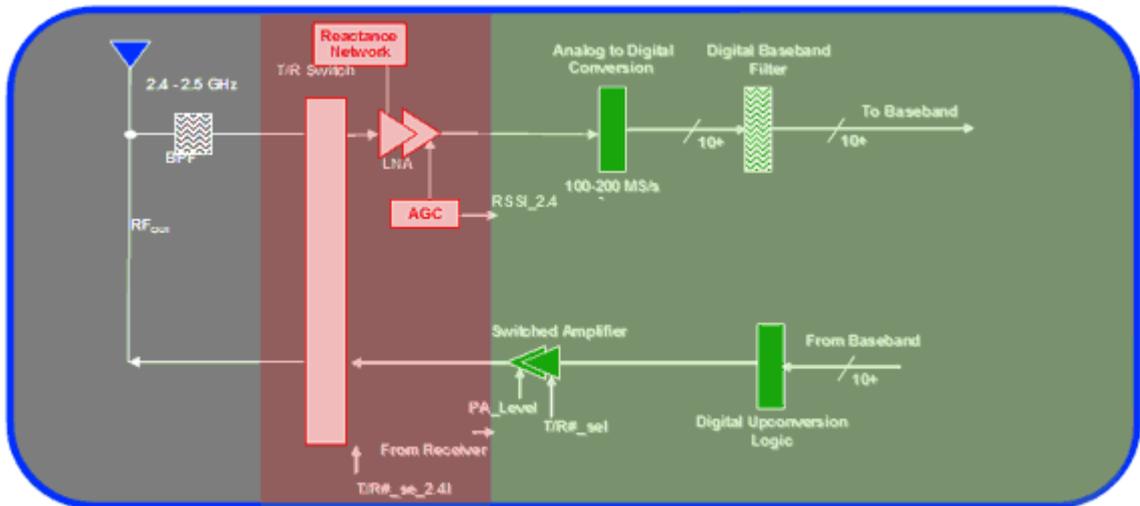
Для решения непростой и крайне актуальной задачи "всеобщей совместимости" различных радиоустройств корпорация Intel приступила к созданию интеллектуальной платформы, способной осуществлять поиск радиосигнала любого стандарта и подключаться к сети в любом месте и в любое время. Платформа будет реализована, фактически, в одном полупроводниковом элементе, интегрированном в каждом чипе Intel, что даст возможность миллионам устройств "разговаривать" друг с другом и "понимать" друг друга.

Вместе с тем, возникают проблемы с устоявшимися технологиями, которые подчас мешают развитию новых ноу-хау. В качестве примера можно привести передачу звука в сотовых сетях на какой-то жёсткой частоте. Данный механизм накладывает свои ограничения - например, многодиапазонные сотовые трубки стоят дороже, в разных частях света нужны разные аппараты, невозможно построить гибкую и адаптируемую под географические условия сеть. Зачем, например, выпускаются двухдиапазонные сотовые телефоны? Просто базовая станция с меньшей частотой может использоваться на больших расстояниях, и тем самым экономить бюджет оператора, а базовая станция с высокой частотой обеспечивает лучшее качество передачи данных и речи. Но двухчастотный передатчик усложняет конструкцию, повышает себестоимость и добавляет ряд инженерных проблем при создании продукта.



Принципиальная схема радио сегодня

Продукты, соответствующие идеологии "Бесплатного радио Intel", будут следующим эволюционным шагом, когда радио из аналогового превратится в полностью цифровое. Логика сможет сама выбирать необходимую для работы частоту, подстраиваться под разрешённые в географической зоне стандарты и частотные диапазоны, работать во всех возможных беспроводных сетях - например и в Bluetooth, и в Wi-Fi, и в GSM/GPRS, и даже в CDMA2000 сетях. Фактически, при помощи меню вы сможете выбрать, в какой именно сети в данный момент работает ваш телефон. А, в идеале, переключение между сетями будет происходить для вас полностью прозрачно.



Принципиальная схема радио завтрашнего дня

Впервые концепция Radio Free Intel прозвучала в феврале 2002 года на ежегодном Форуме Intel для разработчиков, когда старший вице-президент и технологический директор Intel Патрик Гелсингер впервые выдвинул идею о том, что необходимо добавить функциональность беспроводной связи любому устройству путем интеграции радиоэлементов в его микрочипы. При этом массовое производство подобных комбинированных микросхем позволит свести затраты на интеграцию дополнительной функциональности практически к нулю.

Концепция "Бесплатного радио Intel" предусматривает наличие радиопередатчиков, работающих в нескольких стандартах и на нескольких частотах, но на единой платформе,

встроенной в недорогие кремниевые чипы. "Суть идеи бесплатного радио Intel заключается в том, что все беспроводные протоколы реализуются с помощью одного набора компонентов, встроенных в компьютерный чип, - сказал Стив Павловски, директор группы коммуникационных технологий корпорации Intel. - Чтобы достичь подобной цели, аналоговые радиочастотные и логические части радиоустройств должны "уметь" автоматически перестраиваться для адаптации к разным сетям и протоколам".

Естественно, Intel не одна разрабатывает такую перспективную технологию, свои наработки есть у лидеров телекоммуникационного рынка - компаний Texas Instruments и Motorola, уже несколько лет работают в этом направлении Sandbridge, General Dynamics и Analog Devices. Другой вопрос, что участие такого гиганта индустрии, как корпорация Intel, в решении столь насущной проблемы наверняка придаст процессу мощный импульс. "Хорошо, когда в работу включается крупный производитель, - говорит вице-президент PicoChip, британской компании по производству коммуникационного оборудования Руперт Бейнс. - Это лишний раз подтверждает то, что мы занимаемся действительно перспективными вещами".

Устройства Radio Free Intel смогут самостоятельно балансировать характеристику эффективной мощности сигнала, то есть при необходимости снижать расход энергии, что обеспечит более длительное время автономной работы оборудования. Пропадёт, как таковая, проблема модернизации до следующих стандартов - ведь всё, что нужно для перехода в нужный режим работы такого устройства, это программная часть с занесёнными данными новых протоколов и стандартов. Мы уже писали об адаптивной топологии будущих сетей, и по этому поводу стоит прочесть [наш материал](#) с IDF.

Если верить Intel, то уже через несколько лет в процессор будет обязательно встраиваться радиочасть, и каждый компьютер, каждый электронный прибор смогут взаимодействовать с другим прибором. Сегодня сложно оценить, как именно это изменит нашу модель пользования техникой. Скорее всего, к тому моменту появятся абсолютно новые технологии и требования, о которых сегодня мы даже не задумываемся, как не задумывались и даже не догадывались в начале девяностых о том, что во время работы компьютер может играть цифровую музыку, работать с цифровыми фотоснимками или рисовать фантастические миры в полном 3D в реальном времени. А есть ли у нас хоть одна причина не верить в будущее?

Рассказывают, что в 1983 году во время высадки американских войск на Гренаде одному армейскому генералу пришлось срочно искать мелочь для таксофона, чтобы наладить связь с другим подразделением - оказалось, что армейские радиостанции разных родов войск не могли связаться друг с другом. Чтобы избежать подобных казусов в будущем, военные решили разработать радиотехнологию, способную обеспечивать связь в мультислотном режиме. Вскоре к разработке программируемого радио присоединились операторы сетей мобильной связи, полиция и пожарные.

Упомянутая уже компания PicoChip недавно предложила программно-интеллектуальную платформу для базовых станций сотовых сетей. Сегодня базовая станция предназначена для работы в одном единственном стандарте, и процесс смены стандарта или его обновления долог, дорог и сложен. С программно-интеллектуальным радио, наоборот, всё происходит легко и просто: не надо менять никакого оборудования, необходимые операции можно совершить в операционном центре. По мнению экспертов, использование подобных технологий может сэкономить сотовым операторам десятки миллионов долларов в момент выхода на новые рынки.

Военно-морские силы США уже используют цифровое интеллектуальное радио, разработанное компанией General Dynamics, - устройство размером с переносной телевизор и весом не более сотни килограммов заменяет радиорубку подводной лодки, забитую шкафами с радиооборудованием. Правда, стоит этот аппарат около 400 тыс. долларов...

Как шутливо заметил Руперт Бейнс, "у мобильных терминалов, предназначенных для массового рынка, есть три главные характеристики, влияющие на пользовательские предпочтения: стоимость, стоимость и еще раз стоимость, - и только после этого потребители оценивают время автономной работы от батареи и размеры устройства". Пока же устройства на базе программно-интеллектуальных радиоэлементов стоят больше, чем "гибридные" устройства.

"Бесплатное радио Intel", предоставляющее пользователям беспроводную свободу, базируется на трёх китах - новых аппаратных разработках, обновлённом программном обеспечении и свободном, не лицензируемом радиоспектре. Эволюция радио на аппаратном уровне

Чтобы интегрировать возможности беспроводной связи в каждое полупроводниковое устройство, корпорация Intel предлагает использовать преимущества производства стандартных CMOS-полупроводников. Большие объемы и низкие издержки этого производства сделают "Бесплатное радио Intel" простым и удобным для конечных пользователей. Подход Intel к архитектуре программно-интеллектуального радио основан на использовании набора специальных элементов с определёнными вычислительными функциями. Программируя различные связи между ними, можно реализовать все необходимые протоколы радиосвязи. При этом технология MEMS (micro-electrical mechanical systems) позволяет существенно уменьшить размер и стоимость пассивных компонентов (катушек индуктивности, конденсаторов и др.), необходимых в электрической радиосети.

Еще одна область, где ведутся исследования и разработки, - использование, так называемых, "умных антенн", позволяющих с помощью специальных каскадов усиливать радиосигнал, а также концентрировать его в ограниченном телесном угле, что не только улучшает качество приёма, но и снижает возможность помех со стороны других передатчиков. Применение технологии "умных антенн" приводит к более эффективному использованию частотного спектра, увеличению пропускной способности сети и её ёмкости при одновременном уменьшении интерференции в переполненном частотном спектре.

Сочетание всех этих технологий позволит реализовать идею "гибкого радио" - устройства, способного выбирать, в зависимости от ситуации, тот радиопrotocol и ту частоту, которые ему удобнее использовать в данный момент. Такое решение значительно приблизит тот день, когда универсальный интеллектуальный роуминг перестанет быть уделом фантастов.

С каждым днем идея "Бесплатного радио Intel" приближается к своему реальному воплощению. Исследователи из лаборатории цепей Circuit Research Lab (CRL) корпорации Intel в Хиллсборо (штат Орегон) в сотрудничестве с лабораторией коммуникационных технологий уже разработали и изготавливают ключевые блоки для цифрового процессора автоматически перестраиваемого радио. Вместо того, чтобы дублировать контуры цепей для обеспечения работы на нескольких частотах и в нескольких стандартах, исследователи создали перепрограммируемые цепи, которые с помощью программного обеспечения

позволяют реализовывать различные варианты беспроводных коммуникаций.

Рэм Кришнамурти, менеджер исследовательской группы высокопроизводительных цепей в CRL так описывает опыт создания первых опытных образцов: "Наши исследования фокусируются на ключевых строительных блоках, таких, как фильтры-умножители и декодеры Viterbi для созданного нами устройства, способного работать с шестью протоколами (в будущем - с ещё большим количеством) при помощи одного чипа с очень небольшим энергопотреблением".

Кришнамурти объясняет, что такие чипы представляют собой новый класс архитектур, называемых гетерогенными перестраиваемыми мультипроцессорами. Они имеют высокую вычислительную эффективность в сочетании с низким энергопотреблением.

По мнению Стива Павловски, существуют два основных требования к перестраиваемой логике - подобный элемент должен иметь возможность перестраиваться не менее гибко, чем процессор для обработки цифровых сигналов, а энергопотребление его должно быть сравнимо с процессорами на базе ASIC-конфигураций.

Исследователи подразделения Corporate Technology Group корпорации Intel разрабатывают вычислительную архитектуру и логику для выполнения этих требований. Архитектура для процессорной подсистемы будет содержать комбинацию вычислительных элементов, организованных в сеть, оптимизированную для адекватного функционирования и масштабируемости.

16-битный чип усилителя, разработанный исследователями Intel в рамках проекта Paragon, совершает миллиард операций в секунду (GOPS, gigaoperations per second) и потребляет энергию мощностью всего 22 милливольт. Он сделан по 90-нм технологии для CMOS-полупроводников и занимает площадь 0,03 кв.мм. Это один из наиболее высоких показателей по плотности на 1 GOPS/Ватт, достигнутых за всю историю развития микропроцессоров.

Рекорд был достигнут благодаря использованию уникальной архитектуры, в состав которой входят программируемый процессор, набор гетерогенных перестраиваемых вычислительных элементов и перестраиваемые же технологии взаимосвязи между элементами. Данная конструкция позволяет реализовывать гораздо большую гибкость, чем решение со специальными интегральными цепями (ASIC, application specific integrated circuit). По мнению Рэма Кришнамурти, использование таких архитектур значительно приближает возможность организации беспроводного доступа в любое время, в любом месте и через любой протокол - то самое "Бесплатное радио Intel".

Программная часть бесплатного радио

Много лет эксперты, занимающиеся обеспечением безопасности людей в городах, били тревогу по поводу того, что полиция, пожарные, машины экстренной медицинской помощи не могут общаться друг с другом по радио, поскольку их устройства работают на разных частотах. Увы, их предостережения так и оставались "гласом вопиющего в пустыне", пока не случилась трагедия 11 сентября в Нью-Йорке. После этого теракта активно заработал специальный комитет по совместимости (NTFI, National Task Force on Interoperability), который выпустил подробный документ с анализом возможности организации единой радиосвязи между различными государственными структурами в периоды острой на то необходимости.

"Коммуникационная индустрия стала активно искать пути создания радио, адаптированного для нескольких частотных диапазонов, "понимающего" различные протоколы передачи данных, перестраивающегося в процессе работы и способного к простой модернизации - и все это в одном-единственном устройстве", - говорит Рави Мурти, инженер сетевого программирования подразделения Corporate Technology Group корпорации Intel.

Однако, несмотря на колоссальный прогресс в CMOS-полупроводниках и других технологиях, встроить радио в чипы оказывается совсем не просто. Дело в том, что радио - это аналоговая структура, работающая на частотах и с напряжениями, не являющимися дискретными (т. е. такими, которые можно выразить набором нулей и единиц), а изменяющимися непрерывно в каком-то диапазоне. Разработчики корпорации Intel столкнулись с нетривиальной проблемой: как превратить аналоговые величины в цифровые. К счастью, у них уже был накоплен определённый опыт работы с аналогичными задачами.

Например, создавая технологию "беспроводного Интернета на чипе", инженеры Intel преодолели существенные сложности, связанные с совершенно различными путями оптимизации процессов производства коммуникационных и вычислительных устройств. Вместо того, чтобы идти независимыми путями при создании отдельных чипов для коммуникаций, вычислений и памяти, разработчики Intel использовали последние достижения в области создания флэш-памяти и объединили цифровые и аналоговые возможности. Правда, для этого пришлось объединить усилия и знания целого ряда экспертов из самых разных подразделений. Не меньших успехов добились разработчики ARA (Adaptive Radio Architecture, архитектуры адаптивного радио) - набора программ, который поддерживает целый ряд систем коммуникаций, как проводных, так и беспроводных. "ARA позволяет быстро развивать и совмещать различные перестраиваемые устройства на единой платформе", - говорит Джо Питареззи, менеджер по развитию бизнеса в лаборатории сетевой архитектуры Intel (Network Architecture Lab).

По мнению разработчиков Intel, эта программная платформа будет развиваться и вскоре сможет поддерживать как "гибкое радио", способное выбирать нужный сигнал из широкого диапазона частот, так и "подстраиваемое радио", которое будет запрограммировано на самостоятельный поиск нужного сигнала. Эту интеллектуальную платформу с широким кругом возможностей называют программно-определённым радио (SDR, software-defined radio).

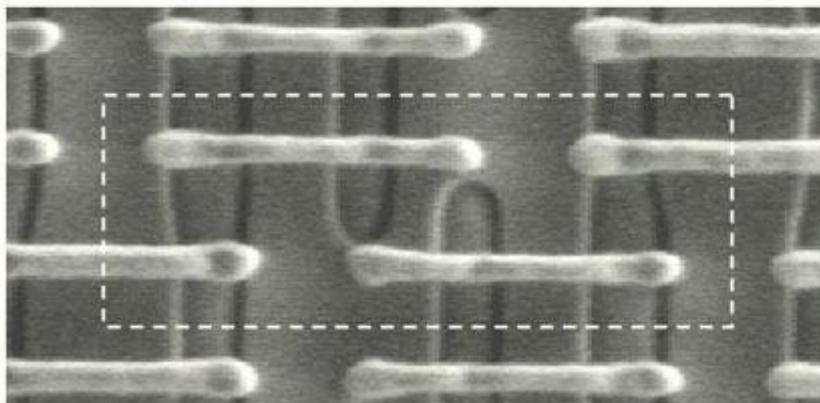
Гибкая программная архитектура SDR обеспечивает пользователю возможность работы с различными протоколами передачи данных, быстрой перестройки и модернизации. Ноутбуки, сотовые телефоны и карманные компьютеры, снабжённые таким программным обеспечением, смогут динамически программироваться для перестройки. Другими словами, одни и те же детали оборудования в таких устройствах смогут выполнять различные функции при различных обстоятельствах. Кроме того, многие функции будут исполняться программно. В список таких функций входит генерация сигнала, модуляция волн, обработка сигнала и использование многоуровневых протоколов.

И снова процессоры: 65 нанометров уже вчера

Вчера, в десять вечера по Москве, корпорация Intel официально отменила эмбарго на информацию о достижении новой ступени в эволюции процессоров - получении первых чипов статической памяти SRAM, с использованием технологического процесса 65 нм. Коммерческое производство такой памяти начнётся только в 2005 году, и Intel

рассчитывает быть первой на рынке с подобным технологическим процессом.

Шеститранзисторная ячейка статической памяти SRAM площадью 0.57 мкм²

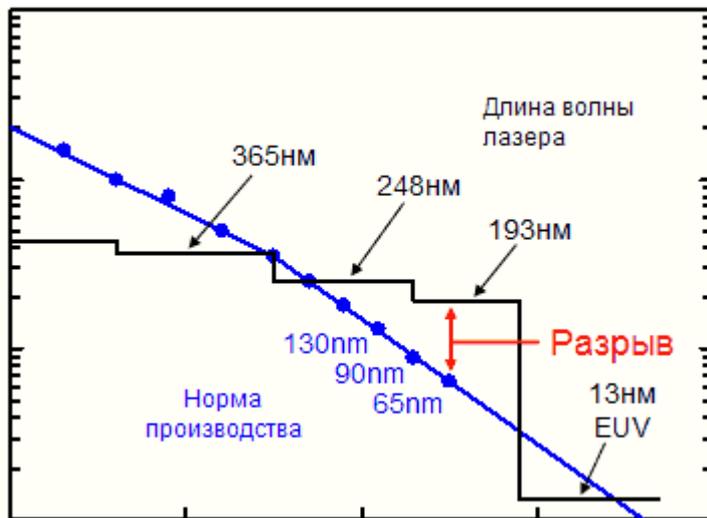


$$0.46 \times 1.24 = 0.57 \mu\text{m}^2$$

В представленной SRAM-памяти скомбинированы новые транзисторы с низким энергопотреблением и технология "напряженного кремния" второго поколения, технологии медных соединений и материал диэлектрика с характеристиками low-k. Плотность компоновки транзисторов впечатляет - при технологии 65 нм в 1 квадратном миллиметре чипа уместится 10 миллионов (!) транзисторов, а ширина "канала" уменьшится до 35 нанометров. Для сравнения: в самых современных процессорах Pentium 4 ширина канала не бывает меньше 50 нанометров.

В четырехмегабитном чипе SRAM были использованы ячейки с размером 0,57 кв.нм., каждая из которых состоит из 6 транзисторов. Использование столь малых ячеек позволит интегрировать больше кэша в будущие модели процессоров, тем самым, повышая их производительность.

Но технологический процесс P1264, с нормой производства 65 нм, интересен не только малыми размерами транзисторов и материалами. Дело в том, что на сегодняшний день не существует коммерческого литографического оборудования для производства чипов по столь тонкому процессу. В 2001 году, при разработке процесса производства 130 нм, инженеры Intel столкнулись с необходимостью использования для этого степперов с длиной волны 248 нанометров. Это было связано, прежде всего, с тем, что производитель степперов, компания SVG, задерживала поставки оборудования, и тем самым, могла сорвать планы Intel по внедрению нового технологического процесса.

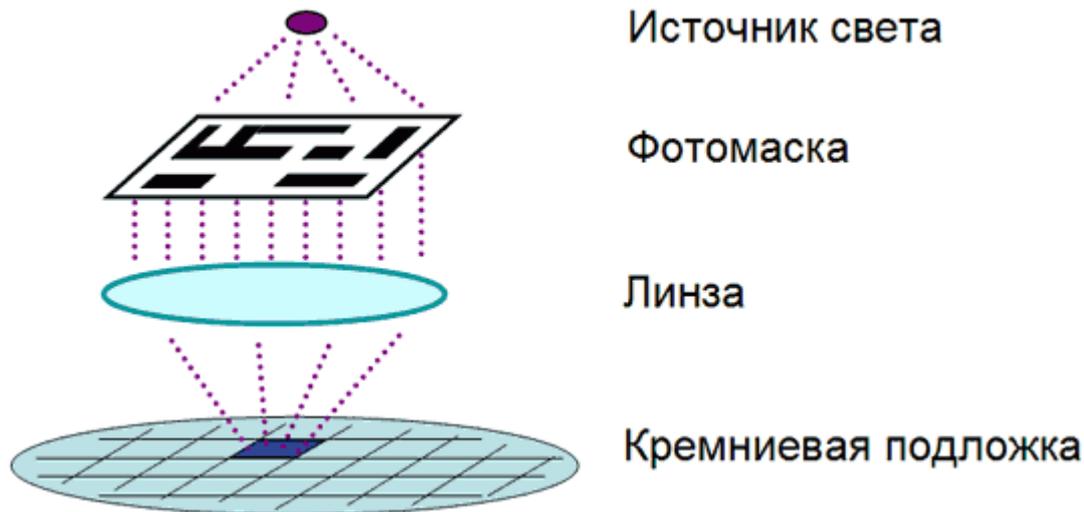


Нормы производства эволюционируют быстрее, чем оборудование для литографии

Для адаптации их к 130 нм инженеры разработали технологию фазового сдвига, которая позволяет получать литографию меньше, чем длина волны. Законы оптики предусматривают возможность "игры" длиной волны ультрафиолета в широких пределах при помощи фазового сдвига, и именно этим воспользовалась Intel. Сегодня при помощи той же технологии были модифицированы приборы с длиной волны 193 нм, которые изначально рассчитаны на производство процессоров по 90-нанометровым нормам.

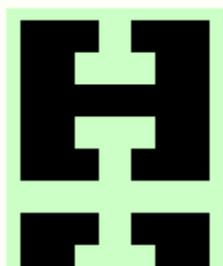
Такая модификация производства позволила Intel значительно сэкономить на закупке оборудования (40-50 миллионов долларов за степпер для литографии по 157 нм нормам для 65 нм) и даже заявить о том, что с 193-нанометровых степперов она перейдет к экспозиционным установкам для сверхглубокой ультрафиолетовой литографии EUV (Extreme Ultra Violet). Это случится ближе к 2009 году, а до этого момента запас возможностей 193-нанометровых приборов позволит заниматься производством 65- и 45-нанометровых чипов (т.е. до 2007 года, до самого момента внедрения High-K диэлектриков, новых материалов и металлических слоёв, описанных выше). Если взглянуть на таймлайн планов компании, то мы видим, что на EUV оборудовании будут создаваться процессоры с технологическими нормами 32 и 22 нанометра соответственно (2009-2011).

Как работает модифицированная схема? Давайте рассмотрим на примере процесса производства подложки, без углубления в лишние технологические подробности:



Принципиальная схема процесса

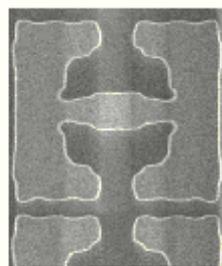
Экспонирующая система состоит из источника света (лазера с длиной волны 193 нм), который через маску и фокусирующую систему (линзу) наносит на подложку нужный рисунок. Для соблюдения производственной нормы 65 нанометров такая система непригодна из-за слишком широкой волны излучения, и тогда Intel использует технологию формирования при помощи фазосдвигающей маски и оптической коррекции:



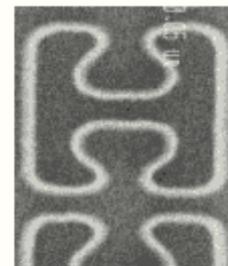
Drawn structure



Add OPC features



Mask structure

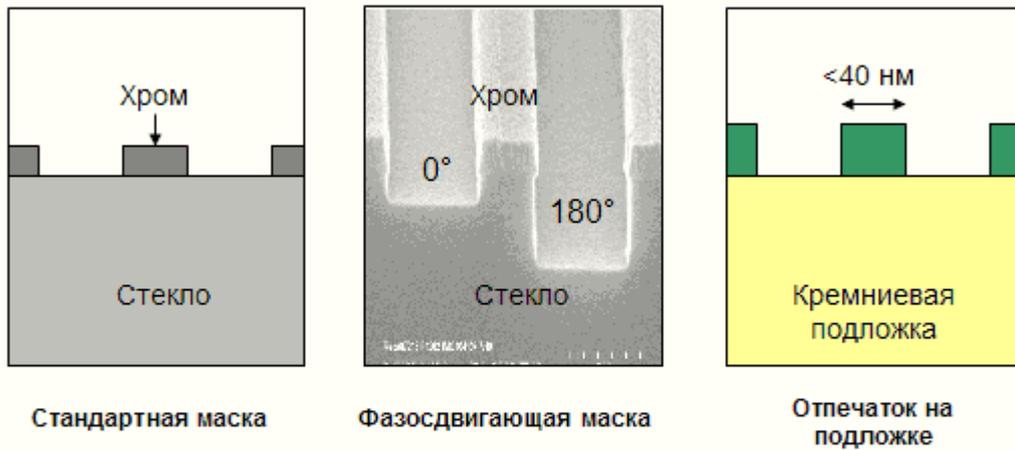


Printed on wafer

Модификация процесса

Улучшенные фазосдвигающие маски

Вид сбоку



Фазосдвигающие маски позволяют наносить отпечаток на подложку с нормой 40 нм, используя существующее оборудование с длиной волны лазера 193 нм

Обычная и фазосдвигающая маска

Результат такой модификации процесса производства очень разнопланов - во-первых, компания существенно экономит на новом оборудовании, и ей проще будет переоборудовать в 2005 году все свои фабрики на новый технологический процесс. Во-вторых, такой переход заметно экономичнее, что позволит снизить себестоимость будущих процессоров. В текущий момент технология производства с нормами 65 нм ведётся на заводе D1D в Хиллсборо, штат Орегон:

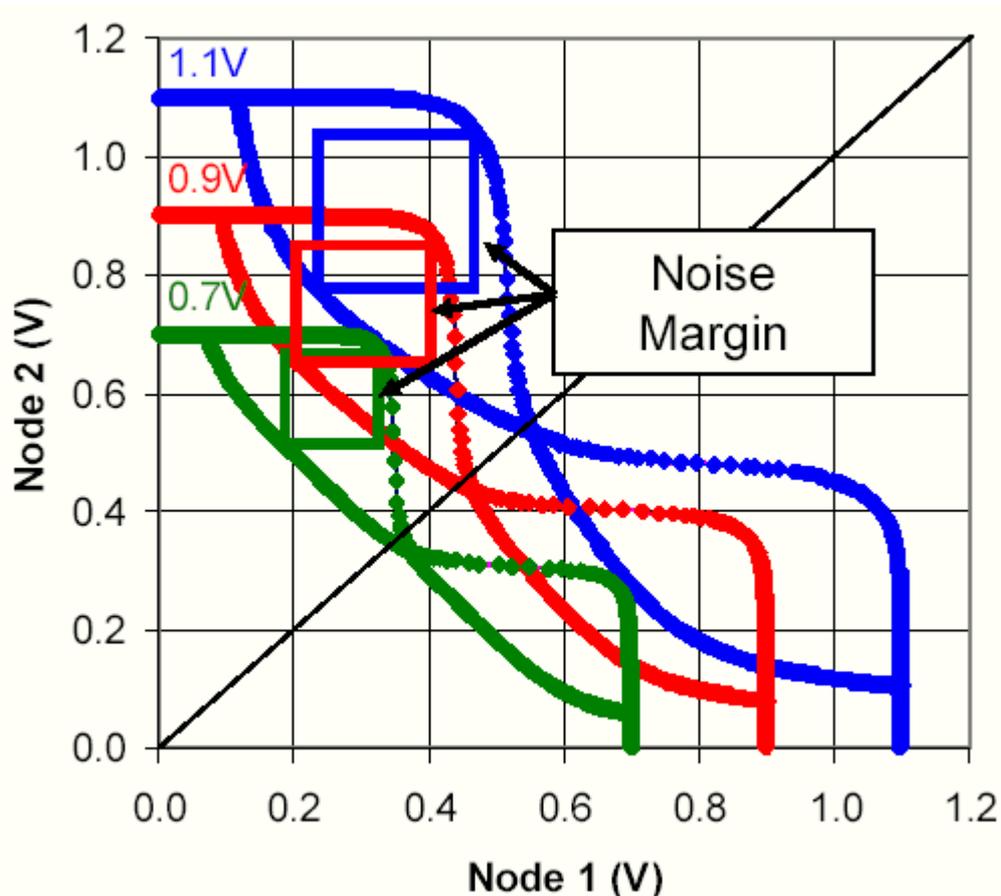


Завод Intel D1D в Хиллсборо

В данный момент инженеры работают с техническими образцами, но уже заявлено, что на создание первых трёх наиболее важных слоёв уходит всего 5 дней, и что к моменту ввода технологии в коммерческую эксплуатацию процент выхода годных чипов будет значительно более эффективным, чем на более примитивных процессах производства (см. схему выше).

Что касается D1D, то достаточно отметить, что "чистая комната" насчитывает в объёме 176 тысяч квадратных футов, что эквивалентно площади, занимаемой тремя с половиной полноразмерными футбольными полями, и именно здесь вводятся в эксплуатацию все современные процессы и инструменты: производственная линия с оборудованием, имеющим длину волны 193 нм, восьмислойная металлизация, медные соединения, low-k и в будущем high-k диэлектрики и т.д. И именно этот завод послужит базой для работы с нормами 65 и 45 нанометров.

Параллельно с уменьшением размеров транзисторов, Intel добилась улучшения шумовых характеристик, что отражено на следующем слайде:



Кстати, из разговора с Марком Бором вчера мы узнали, что SRAM-ячейки, для которых приведён график выше, разработаны с учётом эксплуатации их с изменяемым напряжением, то есть в диапазоне 0.7-1.1В, что и отражает слайд выше.

Будущее уже рядом...

Мы догадываемся, что в последний момент Intel решила не раскрывать нам некоторые конкретные технические детали устройства будущих процессоров, хотя это мало что изменило - не без помощи западных коллег уже произошла публичная утечка информации о серверных продуктах, которые выйдут в 2004 и 2005 годах. Таким образом, можно с уверенностью сказать, что пессимистичные прогнозы тех, кто на протяжении последних десятилетий с завидной систематичностью обещает, что технологии "вот-вот упрутся в свой предел", не сбываются, и, по крайней мере, Intel может обрисовать технологии, которые она будет использовать для наращивания производительности процессоров вплоть до 2011 года.

Стоит также отметить, что до сих пор неизвестно, какие именно технологии будут использоваться в процессорах 2007+, поскольку из перспективных направлений можно отметить новый тип транзистора, произведённый по технологии "tri-gate" для обеспечения возможности развертывания нового 45-нанометрового технологического процесса в 2007 году. Ранее описанные в тексте транзисторы - планарные, то есть у них есть один плоский затвор, параллельный поверхности кремниевой подложки. В транзисторе на основе технологии "tri-gate" использована новая трёхмерная структура, в которой затворы "обёрнуты" вокруг трёх сторон кремниевого канала. Все эти устройства рассматриваются Intel в качестве кандидатов для использования в 45-нанометровой технологии. Но какой из них будет выбран? Возможно, даже, что это будет гибридный транзистор.

Кстати, о том, будет ли использоваться технология "кремния на изоляторе" (SOI), и когда можно будет получить детальную информацию о том, что же за чудесный металл будет использоваться при создании будущих чипов, Фрэнк Спиндлер заметил, что в данный момент компания довольствуется описанными выше по тексту технологическими процессами, и, в целом, у Intel нет специального расписания, в котором сказано, когда будут обнародованы конкретные названия используемых в транзисторах материалов. Вероятнее всего, это случится не ранее 2007 года, но до этого момента мы надеемся также получить ещё некоторые технические детали, которые можно будет публиковать. Intel всегда пыталась достичь компромисса между открытым подходом и проблемой коммерческой разумности, да и слишком много информации выдавать конкурентам, как минимум, неразумно. Скорее всего, работа с High-K-материалами будет вестись до самого 2007 года. А там - будущее покажет...