

ПРОЦЕССОР С МИЛЛИАРДОМ ТРАНЗИСТОРОВ КТО ПЕРВЫЙ?

Производительность процессора – основная движущая сила внедрения технологических инноваций в полупроводниковую промышленность. Уменьшение топологических размеров микросхемы на 30% приводит к увеличению плотности размещения транзисторов на кристалле в два раза и быстродействия примерно на 50%. Вот почему и производителей, и потребителей так занимает ответ на вопрос – когда будет достигнут предел масштабирования и кому первому покорится уровень интеграции в миллиард транзисторов на кристалле?

ЧТО ИМЕЕМ СЕГОДНЯ

На рынке уже появились микросхемы, содержащие более 100 млн. транзисторов. Это – выпущенный в конце 2002 года графический процессор модели Radeon 9700 фирмы ATI Technologies и процессор типа NV30 фирмы Rival Nvidia (планировался к выпуску в начале 2003 года). Процессор Radeon 9700 размещен на кристалле размером 14,8x14,8 мм. Объем кэш-памяти его не очень велик, поэтому число "логических" транзисторов действительно составляет около 100 миллионов.

Достижение такого уровня интеграции стало возможным благодаря усилиям специалистов всей мировой полупроводниковой промышленности, направленным на поиск новых материалов, разработку нового оборудования, шаблонов и технологических процессов, на совершенствование методов проектирования и испытаний. При этом внимание уделялось не только уменьшению топологических норм, но и вертикальному масштабированию переходов и затворного диэлектрика, а также сокращению потерь межсоединений. При формировании затвора использована изоляция с помощью мелкой канавки и химико-механическая планаризация. Дамасский процесс осаждения многоуровневой медной металлизации (в процессоре Radeon 9700 – восемь уровней) и применение межслойных диэлектриков с низкой диэлектрической постоянной позволили справиться с проблемой увеличения времени задержки сигнала в соединительных линиях. Для снижения паразитного сопротивления затвора традиционно используемый силицид вольфрама или силицид титана заменен силицидом кобальта. Кроме того, в структуре микросхемы применяются боковые спейсеры из нитрида кремния.

Очевидно, самое большое влияние на повышение быстродействия процессоров оказало агрессивное уменьшение длины затвора, которая при переходе к 80-нм технологии составит всего 32 нм (согласно перспективному плану развития мировой полупроводниковой техно-



логии редакции 2001 года – International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS). Уже сейчас физическая длина затвора n -канального МОП-транзистора, выполненного по 0,13-мкм технологии с шестислойной медной металлизацией, нитридным боковым спейс-ором канала и электродами затвора, стока и истока из силицида кобальта, равна 50 нм. Таким образом, уровень в 100 млн. транзисторов на кристалле достигнут за счет совершенствования материалов и процессов изготовления микросхем, без изменения структуры МОП-транзисторов.

А ЧТО ЖЕ ДАЛЬШЕ?

Согласно закону Мура, производство процессора с 1 млрд. транзисторов должно быть освоено в 2007 году. По оценкам специалистов фирмы Intel, такой процессор будет содержать четыре ядра процессора Itanium 2 и совместно используемую кэш-память. Выполнен он будет по 65-нм технологии, длина затвора транзисторов составит 30 нм, а эквивалентная толщина затворного диэлектрика – около 8 нм. Масштабирование современных КМОП-структур до такого уровня вызовет серьезные проблемы. Поэтому необходимо искать новые пути их решения, в первую очередь – проблемы уменьшения размеров без увеличения токов утечки и, следовательно, рассеиваемой мощности процессора.

По-видимому, наиболее приемлемое из возможных ее решений – применение затворного диэлектрика с высокой диэлектрической постоянной (с высоким k). Самым перспективным на сегодняшний день материалом для этого считается оксид гафния, HfO_2 ($k \approx 22$), благодаря его чрезвычайно высокой термостабильности в сочетании с поликремнием и большой ширине запрещенной зоны. Исследования показали, что толщина HfO_2 -диэлектрика может быть в 5,6 раз больше, чем SiO_2 ($k = 3,9$), при том же значении тока утечки. Для 65-нм технологии его толщина составит ~4 нм. Ключевые задачи, которые потребуют решения при освоении этой технологии, – обеспечение приемлемых плотности состояний на границе раздела, стабильности, плотности дефектов и стойкости к воздействию горячих носителей.

Другой путь предотвращения роста тока утечки предложили разработчики фирмы NEC, опубликовавшие в конце 2002 года результаты исследований азотированного оксида в качестве затворного диэлектрика. При толщине затворного диэлектрика 1,5 нм им удалось на два порядка уменьшить ток утечки и на порядок повысить безотказность прибора. В соответствии с ITRS, эти значения приемлемы для высокопроизводительных устройств, к быстрдействию которых предъявляются повышенные требования. Но пока разработчики должны решить непростую задачу – обеспечить требуемую однородность пленки по толщине, которая меньше 1 нм.

Электроды транзисторов сейчас выполняются из полисилицида с двойной примесью, наносимого на сильнолегированный поликремний. Толщина обедненной области, формируемой у границы раздела затвора и диэлектрика при подаче смещения, равна ~0,5–1 нм. А поскольку эта область включена последовательно с затворным оксидом, толщина ее возрастает, что приводит к уменьшению управляющего тока. Предотвратить формирование обедненной области позволит металлический затвор. К тому же, это приведет к уменьшению сопротивления затвора и будет препятствовать проникновению бора в затворный диэлектрик p -канальных транзисторов. Но для успешного развития такой технологии необходимо подобрать металл, который был бы согласован по значению работы выхода с каналами n - и p -канальных транзисторов. Возможны два решения: использовать для транзисторов обоих типов один и тот же металл со средним значением ширины запрещенной зоны или два различных оптимизированных по своим характеристикам металла. В первом случае процесс форми-

рования транзисторных структур упрощается, но, как правило, параметры транзисторов деградируют. Для обеспечения требуемого быстродействия необходимо формировать сверхрезкий регрессивный (Super Steep Retrograde – SSR) профиль легирования канала. Сейчас исследуется возможность применения различных тугоплавких металлов, в том числе вольфрама и молибдена. Появилось сообщение фирмы Intel об успешном изготовлении n - и p -канальных транзисторов с HfO_2 затворным оксидом и с TaSiN- и TiN-электродами затвора n - и p -канальных транзисторов, соответственно. Ключевые проблемы – совместимость материалов затвора и затворного диэлектрика и введение операции формирования металлического электрода в обычный технологический процесс изготовления КМОП-схем.

В последующие несколько лет претерпят изменения и структуры приборов*, и подложки для формирования высокопроизводительных логических устройств, представляющие собой сильнолегированные кремниевые пластины с эпитаксиальной пленкой с меньшей концентрацией носителей. Изменения будут направлены на решение экспоненциального роста тока в выключенном состоянии (I_{off}) по мере масштабирования размеров элементов микросхем. По данным фирмы Intel, с уменьшением длины канала с 0,5 до 0,07 мкм (при переходе к 0,13-мкм технологии) ток I_{off} увеличился на четыре порядка – с менее 1 нА до ~10 нА/мкм. При переходе к 65-нм технологии (длина затвора – 30 нм) I_{off} возрастет еще на порядок. В результате рассеиваемая мощность процессора с 1 млрд. транзисторов будет на два порядка выше, чем у современного процессора со 100 тыс. транзисторов. Снижению тока I_{off} будет способствовать применение КНС-подложек ("кремний-на-сапфире"). На таких подложках фирма IBM уже несколько лет производит процессоры семейства PowerPC. В конечном итоге этот тип подложек станет доминирующим при изготовлении процессоров.

Господствующее положение сохранит и двойная дамасская технология формирования многоуровневой медной металлизации. При этом, согласно оценкам ITRS, в микросхемах, выполненных по 65-нм технологии, будут использоваться 10 уровней металлизации, шаг локальных токопроводящих линий составит 150 нм, а длина межсоединений достигнет 11 км/см². Но используемое сейчас в качестве межслойного диэлектрика фторированное силикатное стекло будет заменено материалами с более низкими k . Самые перспективные кандидаты – наносимые методом центрифугирования полимеры (подобные полимеру SiLK фирмы Dow Chemical) или составные органические/неорганические материалы (подобные "Черному алмазу" фирмы Applied Materials или "Коралу" фирмы Nivellus).

Внимание разработчиков привлекают и оптические межсоединения, в которых отсутствует RC-задержка сигнала. Это – результат успехов, достигнутых в области кремниевых оптоэлектронных устройств и технологии микроразноустройства механических систем (МЭМС). Правда, по-видимому, в процессоре с 1 млрд. транзисторов такие межсоединения еще не потребуются.

Предугадать, кто же, опередив всех, преодолет планку в 1 млрд. транзисторов на кристалле, трудно. Вероятно, это будет фирма, традиционно занятая разработкой универсальных микропроцессоров, предназначенных для высокопроизводительных систем (например, графических процессоров) или систем-на-кристалле (например, однокристалльных микросхем сотовых телефонов). Кто первый выпустит такую микросхему – IBM, Intel или еще кто-то, неизвестно. Но то, что она появится, – несомненно. Разработчикам микросхем всегда, прежде всего, не хватает транзисторов, и только после того, как их достаточно, можно приступать к расширению функциональных возможностей изделия.

Semiconductor International, 2003, march

* ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2002, №2, с.64.