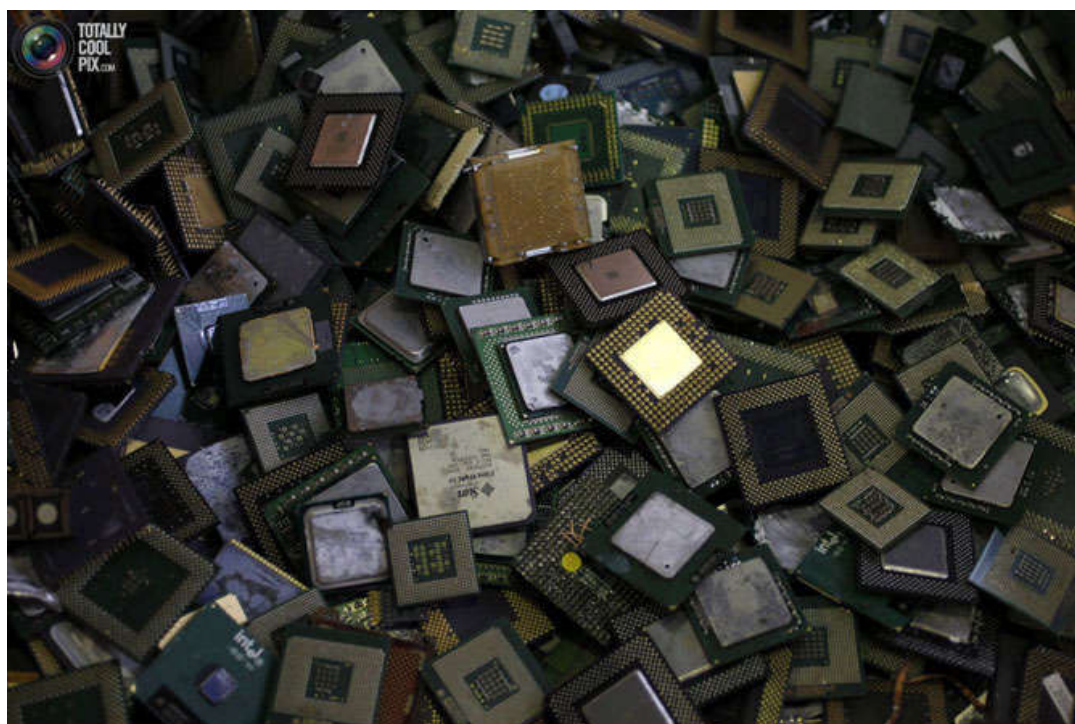


АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО ПРОИЗВОДСТВА



Санкт-Петербург, 2016

Засемков В.С.

Анализ развития микроэлектронного производства

РЕФЕРАТ

Страниц 27, рисунков 12.

Рассмотрены вопросы современного состояния и перспективы развития микроэлектронного производства в мире.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Современное состояние ведущих микроэлектронных производств.....	6
1.1 Закон Мура, как основа оценки темпа развития микроэлектронных технологий.....	7
1.2 Увеличение размера подложки.....	9
1.3 Снижение технологических норм.....	13
1.4 Эволюция топологии.....	16
1.5 Экономические показатели.....	18
2 Обзор основных направлений развития микроэлектронной техники.....	19
2.1 Развитие технологий «больше Мура» (More Moore).....	19
2.2 Развитие технологий «больше чем Мур» (More than Moore).....	24
2.3 За пределами КМОП (Beyond CMOS).....	25
Литература.....	27

Введение

Технический прогресс и степень развитости стран в настоящее время определяется уровнем внедрения информационных технологий и электроники, а также способностью самостоятельно разрабатывать и производить продукцию в высокотехнологичных отраслях. Радиоэлектронная отрасль считается одной из самых динамичных в мире: темпы роста — более 7% в год. По данным доклада Future Market Insights, ежегодный темп прироста в сегменте гражданской электроники вдвое выше — до 2020 года отрасль будет расти на 15,4% в год и достигнет почти \$3 трлн (\$2,976 млрд).

Объем рынка электронно-компонентной базы в России оценивается в \$2,5 млрд в год. На долю отечественных производителей интегральных схем приходится лишь 10–15% этого рынка. А самое слабое направление в российской радиоэлектронной промышленности — вычислительная техника (доля иностранных устройств на внутреннем рынке превышает 90%).

Стремительно развивающаяся на протяжении уже почти 45 лет в соответствии с законом Мура мировая электронная промышленность привела к созданию малогабаритных высокопроизводительных интеллектуальных электронных устройств, спрос на которые непрерывно растет. Но вместе с тем с развитием микроэлектроники возникают и проблемы повышения стоимости производства, обеспечения дальнейшей микроминиатюризации, снижения энергопотребления и т.п.

В начале 21 века одной из основных тенденций развития электроники стало направление, получившее название "окружающий разум" (Ambient Intelligence). Это новое веяние в информационных технологиях, которое подразумевает цифровое окружение, представляющее собой скрытую от пользователя сеть устройств, способных отвечать на нужды, привычки, жесты людей, упрощая их привычные действия в быту. По мере уменьшения размеров такие устройства все легче интегрируются в окружающее пространство, совершенствуются

информационные связи, и в итоге лишь интерфейсы управления оказываются доступными общественному пользователю.

Развития беспроводных коммуникационных систем требуют повышения многофункциональности, расширение частотного диапазона, снижения энергоемкости используемых для решения этих задач микроэлектронных устройств.

Тенденции развития транспорта, применение современных двигателей, выполняемых на основе принципиально новых конструктивных решений и материалов, выдвигают требования работы электронных устройств в расширенных температурных диапазонах и меньших по объему пространствах.

Несомненным локомотивом новых электронных инноваций является также область здравоохранения, начиная от интеллектуальных датчиков и регистраторов различного назначения, контролирующих процессы жизнедеятельности, и заканчивая целыми лечебно-диагностическими комплексами.

Рынок электроники стремительно развивается, и для разработчиков очень важно не упустить возможность занять на нем свое место. Однако реализация интеллектуальных систем диктует необходимость еще большей микроминиатюризации с обеспечением как можно более удобного интерфейса пользователя и особенно более высокого быстродействия микросхем.

1 Современное состояние ведущих микроэлектронных производств

Развитие микроэлектроники началось с изготовления микросхем, содержащих несколько десятков компонентов с минимальными размерами 25 мкм, сегодня эта цифра в соответствии с законом Мура составляет миллиарды компонентов размером ~22 нм. В связи со стремительным развитием микросхемотехники улучшаются такие показатели микросхем, как скорость переключения, плотность интеграции, возможность реализации систем на кристалле.

Однако процессы повышения степени интеграции микросхем сопровождаются следующими факторами:

- ростом цен на производство по новейшим кремниевым технологиям;
- усложнением уровня схемотехники и системотехники вследствие возникновения новых эффектов в материалах, не проявлявшихся при других уровнях проектирования;
- увеличением стоимости современных САД-систем;
- сложностью установки, настройки и использования САД-систем.

Продолжение закона Мура – тенденция ценообразования при производстве микросхем. Сегодня для открытия полного производственного цикла по новейшей КМОП-технологии требуется ~50 млрд. долл. Поэтому в мире всего несколько подобных производств. На сегодняшний день большинство заводов по производству полупроводниковых устройств расположены в Азии. По оценкам экспертов, развитие микроэлектроники приведет к тому, что в мире останутся только две компании — Intel и Samsung, которые будут инвестировать в дальнейшее уменьшение топологических норм. Это самый дорогой путь, который могут позволить себе только гиганты индустрии [1—4].

1.1 Закон Мура, как основа оценки темпа развития микроэлектронных технологий

В апреле 1965 года Гордон Мур (Gordon E. Moore)- директор отдела разработок компании Fairchild Semiconductors в статье для журнала Electronics высказал свое видение развития микроэлектроники на следующие 10 лет. Прогноз базировался на графике, соединяющем 5 точек и связывающий число компонентов ИС и их минимальную цену для периода 1959-1964 г.г. и предположении, что количество компонентов на чипе будет продолжать удваиваться каждый год. В августе 1968 года он стал одним из основателей Intel и в течение последующих семи лет занимал должность исполнительного вице-президента корпорации. В 1975 году на ежегодной встрече IEEE Мур, уже как президент и главный управляющий Intel скорректировал свою закономерность до удвоения каждые два года.

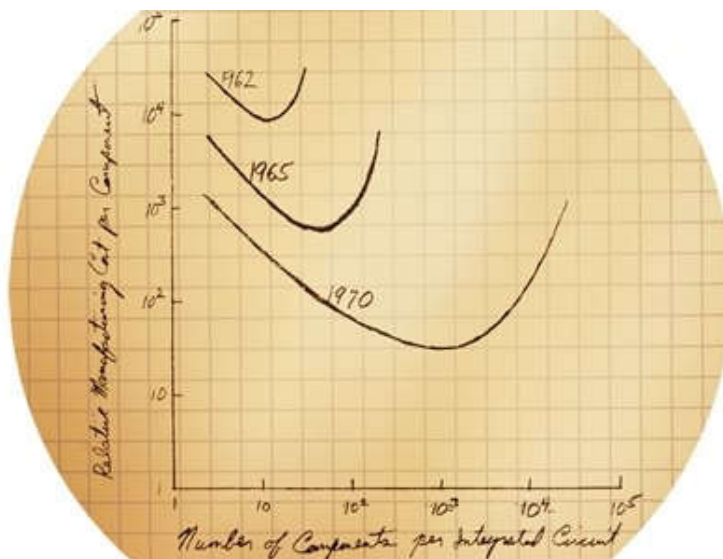


Рис. 1 График из записной книжки Гордона Мура: зависимость относительной стоимости интегрального компонента от их числа на чипе в разные годы.

Это наблюдение руководителя Intel – мирового лидера микроэлектроники, задало темп развития всей индустрии на много лет вперед. Мур занимал обе должности до 1979 года, когда пост президента сменил на должность

председателя совета директоров. В 1980 году информатик Карвер Мид присвоил этой закономерности титул закона. Главным управляющим Intel Гордон Мур работал до 1987 года, а на посту председателя совета директоров — до 1997 года, когда его удостоили звания почетного председателя совета директоров. С 60-х годов Intel следовал этой прогрессии и используя свой «тик-так» метод, продолжает поддерживать эту закономерность в настоящее время.

Закон Мура (как волевое решение руководства флагмана мировой микроэлектроники), огромный рынок, за счет проникновения электроники практически во все отрасли, и почти не ограниченные финансовые средства (как частные, так и государственные) позволили электронной индустрии достичь невероятных успехов.

В ходе полувекковой гонки прошедшей под лозунгом «меньше/быстрее/дешевле» (smaller/faster/cheaper) размеры рабочих областей транзисторов не превышают нескольких нанометров. В 2003 году Гордон Мур подсчитал, что количество транзисторов, ежегодно поставляемых на рынок, достигло 10.000.000.000.000.000.000 (10^{19}). И разработанный в Intel метод производства микропроцессоров предусматривает, что расстояние между транзисторами на чипе составит одну десятитысячную толщины человеческого волоса. Это равносильно тому, чтобы провести автомобиль по прямой длиной в 650 км с отклонением от оси менее 2,5 см. В 1978 году авиабилет по маршруту Нью-Йорк-Париж стоил около 900 долларов, а перелет длился около 7 часов. Если бы авиаиндустрия развивалась в соответствии с законом Мура, то сегодня авиабилет на тот же маршрут стоил бы менее цента, а перелет занял бы менее одной секунды.

За время существования корпорации Intel (то есть с 1968 года) себестоимость производства транзисторов упала до такой степени, что теперь обходится примерно во столько же, сколько стоит напечатать любой типографский знак — например, запятую.

В процессе разработки микропроцессоров, содержащих один миллиард транзисторов, Intel уменьшила величину транзисторов до такой степени, что теперь на булавочной головке могут разместиться 200 млн. транзисторов.

Современные транзисторы производства корпорации Intel открываются и закрываются со скоростью полтора триллиона раз в секунду. Чтобы включить и выключить электрический выключатель полтора триллиона раз, человеку потребовалось бы 25 тысяч лет.

Залогом успешной деятельности Intel на этом направлении служат ежегодные многомиллиардные вложения корпорации в научно-исследовательские разработки, постоянную модернизацию и расширение своих производственных мощностей. Достаточно сказать, что в 2005 году Intel израсходовало на эти цели более 10 млрд. долларов.

1.2 Увеличение размера подложки

В настоящее время освоено производство на кремниевых подложках диаметром 300 мм (опытное 450 мм) и технологические нормы 22 нм (опытное 14-16 нм). Стоимость фабрики для 300 мм пластин по разным версиям составляет от 5 до 15 млрд. долл.



Рис. 2 Fab 42 — фабрика Intel в Аризоне (\$5 млрд.).

Фабрика включает в себя несколько тысяч квадратных метров чистых комнат, в которых установлены более тысячи установок, при усредненной стоимости каждой 4 млн. долл.

Технологическое оборудование требует замены не реже 1 раз в 10 лет (реально чаще) при переходе на новый размер подложек.

Увеличение размера полупроводниковых пластин показано на рисунке 3.

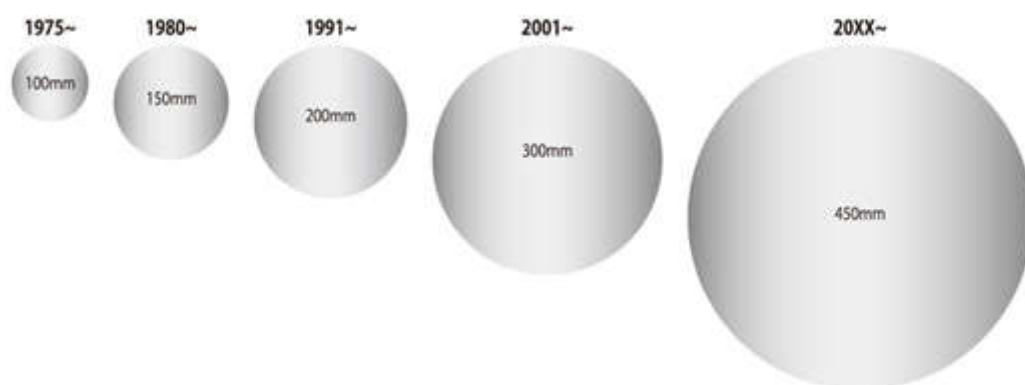


Рис. 3 Рост диаметра пластин, самые первые пластины в диаметре были всего лишь 25мм.

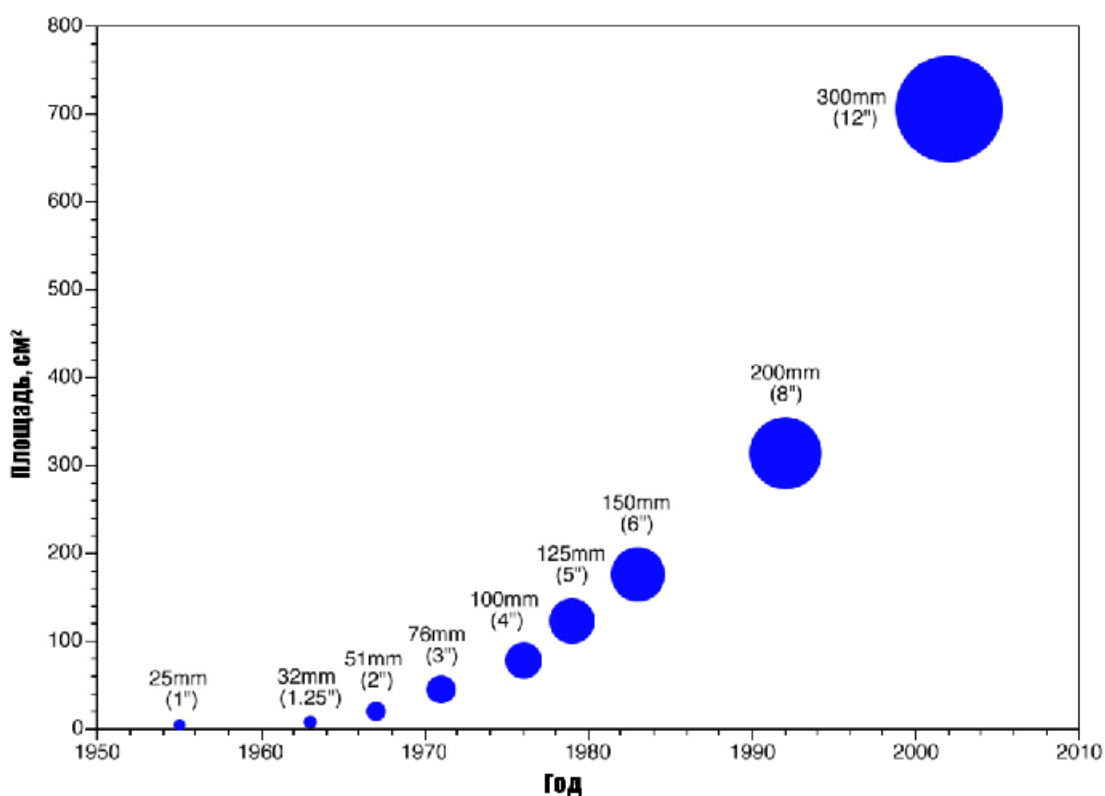


Рис. 4 Зависимость площади подложки от диаметра.

При увеличении пластины стоимость каждого чипа падает. Расчёты показывают, что при переходе с нынешних 300 мм на 450 мм в конечном итоге даст экономию около 30%. Приблизительно так же как произошло при переходе с 200 на 300 мм пластины.

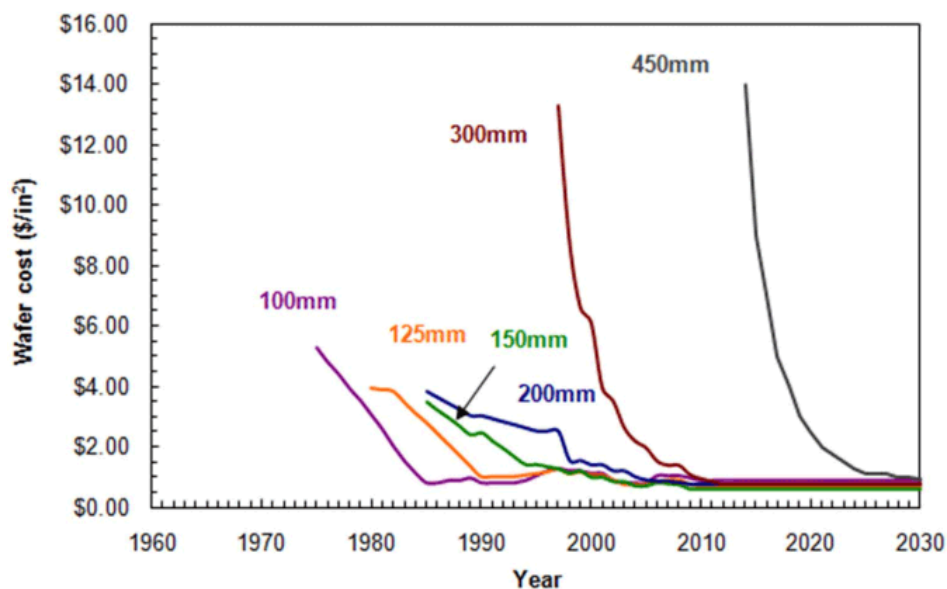


Рис. 5 Изменение стоимости подложки от ее диаметра

Снижение цены производства чипа на 30% это действительно существенно. Но с пометкой, что это произойдёт далеко не сразу, так как первоначально стоимость новых пластин будет значительно выше. Стоимость кв. см 450 мм подложки сравняется с текущей ценой кв. см 300 мм подложки не раньше 2025. А на начало использования будет в 4–5 раз дороже.

Общие тенденции перехода таковы:

- 30–100% увеличение стоимости производственных площадей, тех. обслуживания и оборудования для автоматизации.
- 20–50% увеличение стоимости литографического оборудования.
- 10–30% снижение пропускной способности проецирующего оборудования. Для остального оборудования — без изменений.
- 15% снижение трудозатрат.
- 70% увеличение затрат на реактивы.

Затраты на инвестиции по оценкам могут дойти до 60 миллиардов долларов, и поэтому крупнейшим производителям приходится объединять свои усилия для перехода на новый стандарт. Окупаемость столь крупных инвестиций дело около 8 лет. По крайней мере R&D перехода с 200 на 300 мм пластины окупились приблизительно за такой срок.

Технологические проблемы выращивание кристаллов.

Вызывает опасение вес выращиваемых кристаллов (булей). Вес выращенного кристалла увеличивается в 3 раза, до одной тонны. Возникает проблема при вертикальном подвешивании кристалла за узкое горлышко, толщиной в несколько мм, при процессе выращивания. Затравочный кристалл сам по себе не сможет выдержать вес 450 мм кристалла. Нужен дополнительный способ поддержания кристалла.



Рис. 6 Внешний вид полупроводниковых подложек. Сравнение 450 мм и 300 мм подложек

Любая внешняя вибрация (например землетрясение) способна вызвать изменение в пространственной решётке кристалла. Если такое происходит, кристалл приходится полностью переплавить и выращивание начинается с самого начала. Это отнимает значительное количество времени (до месяца) и тем самым

увеличивает стоимость производства. Так последствия землетрясения в Японии в 2011 году снизили мировой выпуск монокристаллов кремния на 24.5%. По сути выращиваемые кристаллы превратились в мусор. На перезапуск производства ушло больше месяца. Кварцевые тигли для плавки поликристаллического кремния должны быть большими и должны выдерживать вдвое больше времени, требуемое для производства, чем используемые для выращивания 300 мм кристаллов. Если для выращивания 300 мм кристаллов используются тигли размером 81,3 см, то для 450 мм кристаллов необходимы тигли диаметром до 111 см. Чтобы выдерживать такое длительное время выращивания, качество тиглей также должно быть улучшено. Время на охлаждение может увеличиться до 4х раз.

Тепловое прошлое, во время производства кристалла, влияет на количество, размер и распределение дефектов в виде примесей. В отличие от смещений, такие дефекты обычно присутствуют. И хотя они не обязательно приводят к отбраковке кристалла, зато могут сказаться на работоспособности конечных чипов. Поэтому нужно точно контролировать процесс, чтобы минимизировать их появление. Из-за громадных размеров 450 мм кристалла, охлаждаться он будет медленнее, что подвергает его большому перепаду температур и влияет на появление дефектов. Для этого необходим инновационный процесс охлаждения.

1.3 Снижение технологических норм

Топологические размеры элементов (т.н. технологические нормы) задаются процессом литографии. Литография выполняемая оптической засветкой фоторезиста называется фотолитографией. До 90-х гг. фотолитография использовала ртутные газоразрядные лампы, отсекая из их света всё, кроме нужной частоты, совпадающей с одним из пиков («линий») — G (436 нм), H (405) или I (365). После того, как мощности ламп стало не хватать для требуемой производительности, потребовалось внедрить **эксимерный лазер**, что сделали в

1982 г. в IBM (сам такой лазер изобретён в СССР в 1971 г.). В зависимости от газа он даёт длину волны 248 (KrF), 193 (ArF) и 157 нм (F₂). От фторовых лазеров, правда, отказались из-за чрезвычайных технических проблем, решение которых не окупится преимуществами — дело в том, что сам воздух начинает поглощать излучение с длиной волны меньше 186 нм, так что весь литограф надо переделать под вакуум. Это его усложняет и удорожает с 40 до 50 млн. долларов, а сканеров фабру требуется несколько. Поэтому даже самые современные техпроцессы с технормами менее 30 нм всё ещё используют аргон-фторовый лазер. При этом переход на так называемый экстремальный ультрафиолет (ЭУФ, EUV) с длинами волн 13,5 нм и менее рано или поздно всё равно состоится — и без вакуума тут точно не обойтись.

Формирование рисунка на поверхности приобретает большие сложности, когда его размер оказывается меньше длины волны экспонирующего света. Строго говоря, законы волновой оптики не запрещают формирование деталей с таким разрешением. Но начиная с этих размеров линейная оптика заменяется на куда более сложную дифракционную, требующую большую точность при всех операциях — с соответствующим влиянием на цены установок. С точки зрения теории стоит познакомиться с эмпирическим критерием разрешения Рэля (о минимальном угловом расстоянии между точками), числовой апертурой (NA) и технологическим параметром k_1 . Это требует применение новых подходов. Одна из таких продвинутых методик — **вычислительная литография**: использование масок, рисунок которых вычислен с учётом волновых свойств света с целью добиться большего разрешения или меньших искажений при данной длине волны. Первые подобные программы были написаны в начале 80-х и использовались лишь для оптимизации рисунка маски, т. к. недостаток вычислительной мощности позволял моделировать площадь всего в несколько квадратных микрон. К 1998 г., когда замаячил переход на 180 нм (первый техпроцесс с технормой меньше длины волны), мощность компьютеров уже сильно возросла, что позволило использовать более точные алгоритмы и модели. Для современных технорм требуются уже

тысячи процессоров и недели расчётов, чтобы вычислить рисунки для десятков масок, необходимых самым сложным ИС.

К основным методам вычислительной литографии относятся фазосдвигающие маски (PSM) и оптическая коррекция близости (OPC). Используемая с 90-нанометрового процесса (2006 г.) технология PSM — это коррекция толщины отдельных «пикселей» маски для изменения их прозрачности, что меняет фазу проходящего сквозь них света. Учитывая волновые свойства, это позволит (не считаясь с длиной волны) экспонировать на фоторезисте рисунок, отдельные элементы которого либо усилены синфазным наложением волновых пиков, либо удалены противофазным — это увеличивает разрешение, приближая тот самый параметр k_1 к идеалу. Более современная OPC искажает рисунок маски для компенсации ошибок получаемого изображения из-за дифракции падающих волн. OPC нужна уже не для увеличения разрешения, а для исправления искажений одиночных структур, форма которых при таких размерах получается куда хуже, чем если бы элементы были регулярными.

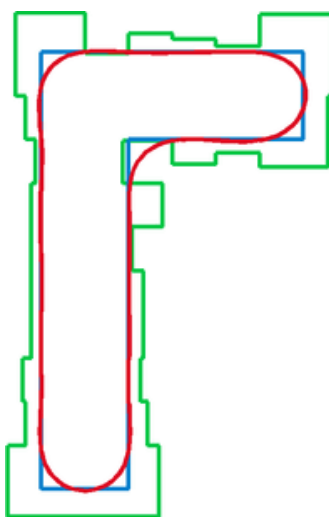


Рис. 7 Пример оптической коррекции близости OPC: требуется вычислить такую маску (зелёный контур), чтобы получаемый ею символ (красный) оказался как можно ближе к требуемому (синий). Без коррекции толщина линий символа окажется больше или меньше в разных частях, в т. ч. за счёт влияния соседних линий. Это может привести как к разрыву дорожки, так и к замыканию пары дорожек.

Стоимость установки для формирования рисунка составляет 70 млн. долл. для 300 мм подложек и производительностью до 500 пластин в сутки, но для 450 мм, по заявлению ASML (производитель EUV-сканеров), цена составит более 120 млн. долл., и очевидно, производительность установки будет еще ниже. Порог окупаемости сканера наступает при скорости экспонирования более 1500 подложек за 24 часа.



Рис. 8 Современный литографический сканер ASML TwinScan 1950i

1.4 Эволюция топологии

Непрекращающееся уже полвека увеличение вычислительных мощностей стало возможно благодаря постоянному уменьшению размеров полевых транзисторов – структурных элементов большинства микрочипов. Их работу можно сравнить с мигающими выключателями, отображающими таким образом данные в нулях и единицах.

Компания Samsung, разработала 10-нм техпроцесс с использованием FinFET транзисторов и завершит его введение в строй в конце 2016 или в начале 2017

года. Также в компании намекнули, что следующий за 10-нм техпроцесс — 7-нм — потребует иного строения транзисторов и, возможно, новых материалов.

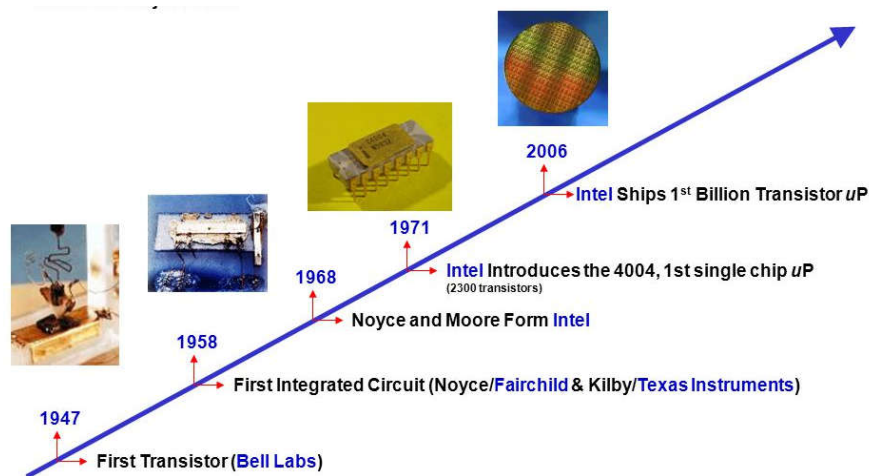


Рис. 9 Путь от первого транзистора к чипу, содержащему более одного миллиарда ключей.

Пока в компании рассматривают вопрос перехода на так называемые GAA FET транзисторы (gate-all-around FET). В транзисторах GAA FET каналы выполняются в виде круглых нанопроводников, расположенных горизонтально или вертикально. Затвор обтекает такой канал со всех сторон. При этом один транзистор может использовать как два канала, так и четыре. В качестве материала для каналов может быть использован не только кремний, но также арсенид индия и галлия (InGaAs).

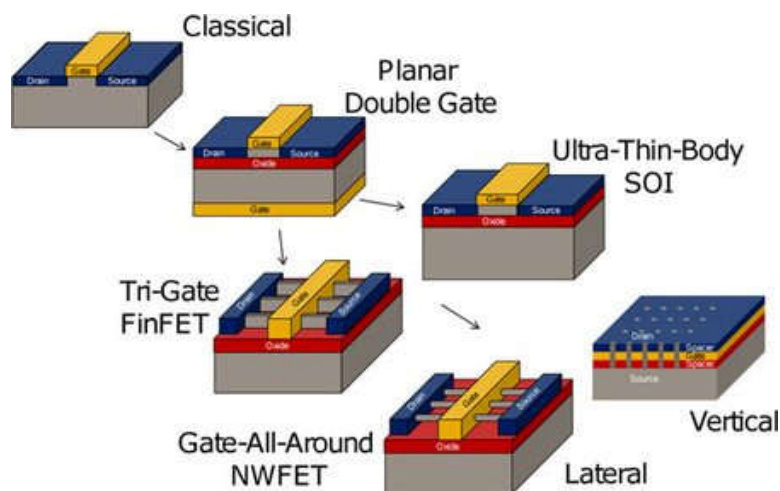


Рис. 10 Варианты топологии (конструкции) транзистора

1.5 Экономические показатели

К стоимости оборудования необходимо прибавить стоимость разработки чипа, изготовление комплекта масок, их неоднократную коррекцию, затраты на сам процесс выпуска чипов с учетом выход годных. Микроэлектронные компании инвестировали в НИОКР по 32–28 нм 1,2 млрд. долларов и 2–3 млрд. для 22–20 нм. Проектирование чипа стоит 50–90 млн. долларов для 32 нм и 120–500 млн. долларов для 22 нм. Компенсация затрат на разработку и производство потребует продать 30–40 млн. 32-нанометровых кристаллов и 60–100 млн. на 20 нм. Общие затраты могут составить более 100 млрд. долл. и чтобы их окупить, необходимо продать количество чипов значительно больше, чем количество людей проживающих на планете Земля в настоящее время. Это ведет к полной монополизации — одна платформа, одна архитектура, одна концепция. Очевидно, что через некоторое время, в мире останется лишь несколько компаний, способных разрабатывать и внедрять самые современные техпроцессы. Все ведущие производители заявляют о готовности перейти на 450 мм подложки и 14–16 нм техпроцессы, но желают сократить риски. Так разработчики и производители технологического оборудования работают только по предоплате, а фабрики обсуждают объединение усилий и выбирают приемлемую топологию транзисторов. Поэтому так неприлично долго затягивается внедрение новых техпроцессов, тем самым нарушая Закон Мура.

Недостаточная загрузка имеющихся 300-мм заводов и заморозка строительства предприятия Fab 42 на этапе ввоза оборудования говорят о том, что Intel может попытаться сохранить ресурсы, которые были запланированы для инвестиций в разработку 450-мм оборудования. Ведутся активные разговоры о переносе планов внедрения массового производства на пластинах диаметром 450 мм с 2017–2018 гг. на 2023 г.

2 Обзор основных направлений развития микроэлектронной техники

В настоящее время физический предел КМОП-технологии практически достигнут. Как следствие, появились следующие три направления развития исследований и разработок полупроводниковых устройств:

"Больше Мура" (More Moore): продолжение развития современных КМОП-технологий до физических и технологических пределов проектирования в соответствии с законом Мура;

"Больше, чем Мур" (More than Moore): объединение в одной микросхеме не только КМОП-компонентов, но и элементов, выполняющих нестандартные функции, например создание микроэлектромеханических систем (МЭМС), наноэлектромеханических систем (НЭМС), сенсорных систем, систем на кристалле;

"За пределами КМОП" (Beyond CMOS): освоение нанотехнологий, новых материалов.

2.1 Развитие технологий «больше Мура» (More Moore)

Но стоимость не единственная причина, большие сомнения вызывает возможность дальнейшего масштабирования. Если не говорить о перегреве кристалла, что обусловлено высокой степенью интеграции, то возникает другая проблема, из-за которой отошли в прошлое так привычные биполярные транзисторы. Работа элементарной ячейки интегральной схемы – транзистора основана на дрейфе носителей заряда в полупроводнике, а при уменьшении размеров, канал транзистора содержит ограниченное количество атомов и контролируемой рекомбинации электроно-дырочных пар уже не происходит. Транспорт носителей носит квазибаллистический или уже чисто баллистический характер. Применение других полупроводников или растягивание-сдавливание решетки (Si-Ge) лишь незначительно улучшают ситуацию.

В 2001 г. IBM изобретает **напряжённый кремний** (strained silicon) — формирование слоя кремния для канала, в котором расстояние между атомами (как минимум в направлении исток-сток) не равно естественному шагу кристаллической решётки (543 пм). Для большего шага сначала внедряется «посевной» слой кремния-германия. Кристалл германия имеет шаг атомов 566 пм. Смешанный полупроводник сохраняет это значение, даже если доля германия всего 17% (это для 90 нм; а для 32 нм — уже 40%). Осаждаемые поверх атомы кремния межатомными силами крепятся к атомам широкой решётки и остаются с её шагом, формируя канал. Разряжение атомов увеличивает подвижность электронов, что ускоряет n-канальный транзистор на 20–30%. Кстати, именно из-за большей подвижности электронов германий первым стали применять в электронике.

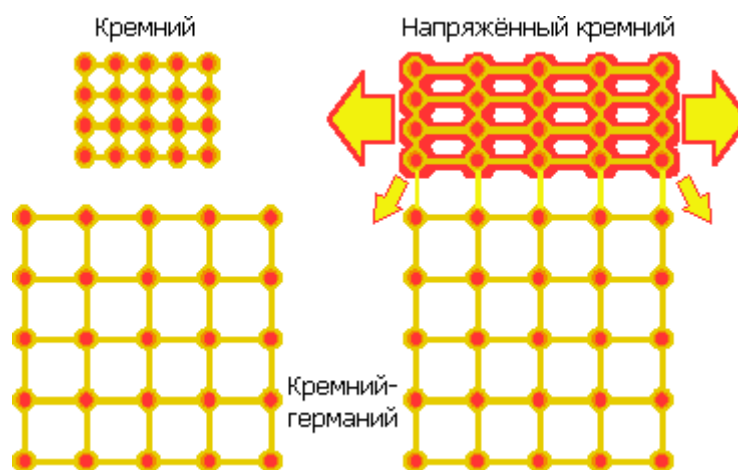


Рис. 11 Кремний до и после осаждения на кремний-германиевый слой.

В 2004 г. эту технологию применили Intel и AMD для техпроцесса 90 нм. Для 65 нм внедрена ионная имплантация германия и углерода в исток и сток. Германий раздувает концы транзистора, сжимая его канал, что увеличивает скорость дырок (т. е. основных носителей заряда в p-канальных транзисторах). Углерод, наоборот, сжимает исток и сток, что растягивает n-канал, увеличивая подвижность электронов. Также весь p-канальный транзистор покрывается сжимающим слоем нитрида кремния. Применяются и растягивающие покрытия.

Всё дело в эффекте квантового туннелирования. К 90-нанометровому техпроцессу толщина затвора уменьшилась до величины от 1,2 (у Intel) до 1,9 нм (у Fujitsu; обе цифры — для n-каналов). А шаг кристаллической решётки кремния, напомним, равен 0,543 нм. При такой тонкости электроны начинают туннелировать сквозь изолятор, приводя к утечке тока. Дело обстояло настолько серьёзно, что для техпроцесса 65 нм уменьшились все параметры транзистора, кроме толщины затвора, т.к. если бы его сделали ещё тоньше, то ни о какой энергоэффективности не стоило бы и мечтать.

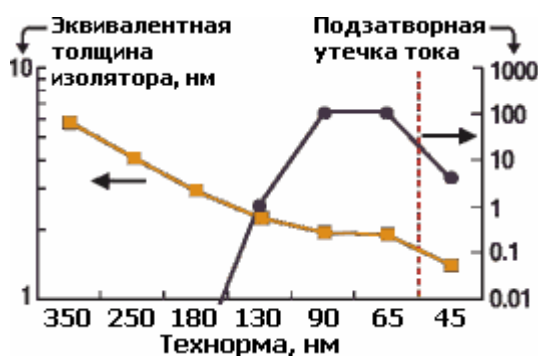


Рис. 12 Графики толщины подзатворного изолятора в SiO_2 -эквиваленте и относительной утечки тока.

Введение высокопроницаемых изоляторов для техпроцесса 45 нм позволило уменьшить эквивалентную толщину, увеличив физическую, чтобы уменьшить утечки для увеличения скорости.

Высокопроницаемый диэлектрик позволяет электрическому полю затвора проникать на большую глубину или толщину, не снижая остальные электрические характеристики, влияющие на скорость переключения транзистора. Так что, заменив применявшийся с 90-х гг. оксинитрид кремния на новый оксинитрид кремния-гафния (HfSiON , $k=20-40$) толщиной в 3 нм, для процесса 45 нм удалось уменьшить утечки тока в 20–1000 раз. Для получения такой же скорости работы старый затвор пришлось бы делать толщиной в 1 нм, что было бы катастрофой. Встречающиеся сегодня цифры толщин подзатворных изоляторов менее чем в 1 нм являются как раз такими SiO_2 -эквивалентами и применяются только для вычисления частоты, но не утечки. Диоксид кремния, впрочем, до сих пор

имеется в виде нижнего подзатворного слоя, но используется только как физический интерфейс для совместимости с текущими техпроцессами.

Межсоединения

Микроэлектронщики давно хотели использовать медные межсоединения вместо алюминиевых, т. к. удельное сопротивление меди меньше. Это значит, что «медные» чипы меньше выделяют тепла и быстрее работают, т. к. меньшая часть коммутируемого транзисторами тока уйдёт в нагрев, а не в переключение других транзисторов. Однако если в линиях электропередач и прочих проводах медь применяется давно, то микроэлектроника не могла внедрить столь полезный металл десятки лет. Причина в том, что после осаждения меди при дальнейших процессах нагрева она диффундирует (внедряется) в подлежащие элементы, особенно в кремний, что даже получило термин «медное отравление».

В 1997 г. IBM наконец-то решила задачу. Сначала медь надо осадить. Но из-за её химической стойкости её нельзя протравить плазмой сквозь окна в фоторезисте (не удалив при этом оставшуюся, т. е. маскирующую часть самого резиста), как это делается для алюминия. Вместо это применяется «дамасская работа» (damascene): процесс, похожий на изготовление булатной стали с мелким орнаментом. Сначала в изоляторе протравливаются канавки для дорожек. Далее вся поверхность выстилается барьерным металлом (который чаще всего оказывается нитридом титана или вольфрама, что, строго говоря, относится к керамике), не допускающим диффузии, но пропускающим ток. Его толщина должна быть небольшой, т. к. его сопротивление всё же больше, чем даже у алюминия.

Далее на всю поверхность осаждают толстый слой меди, переполняющий канавки. Т. к. плазмохимическое травление (оно же — реактивное ионное травление, RIE) не подходит, используется химико-механическая планаризация (ХМП или CMP). До 90-х гг. она считалась слишком грязной и дефектной для

тонкого производства, т. к. абразивные частицы полировальной пасты создавали острые осколки стираемого слоя, да и сама паста неидеально чистая. Но для медного слоя ХМП оказалась лучше имеющихся способов, т. к. процесс полировки металла останавливается на границе с изолятором (точнее, с его не вытравленными частями, находящимися выше дна канавок). В результате на чипе остаётся очень плоский слой с внедрёнными медными дорожками, не выходящими по высоте из окружающего изолятора. Более того, так называемое двойное воронение позволяет одновременно получить ещё и вертикальные проводящие окна, соединяющие текущий слой с предыдущим. Сверху всё покрывается ещё одним барьерным слоем, излишки которого вытравливаются над внутрислойным изолятором, но не над дорожками. После этого можно осаждать уже межслойный изолятор для следующего проводящего слоя.

К особенностям направления More Moore относятся:

- увеличение сложности техпроцессов;
- применение новые материалов, в том числе диэлектриков с низкой и высокой диэлектрической постоянной (low-k и high-k);
- разработка новых архитектур компонентов;
- освоение новых методов схемотехники (борьба с разбросами характеристик и статическими утечками);
- внедрение новых архитектур на системном уровне (повышение надежности, избыточности).

В связи с тенденцией перевода производств кремниевых приборов в Азию европейская микроэлектронная промышленность остается преимущественно без производственных мощностей (fables). Тем не менее, Европе очень важно сохранять лидирующие позиции в схемотехнике. Для поддержки мирового уровня на этих позициях разработчикам приходится постоянно повышать квалификацию и углублять свои научные знания, с тем чтобы поддерживать технологические ноу-хау, преодолевать физические пределы и

феномены второго порядка при освоении глубоких субмикронных топологических норм, добиваться успеха в разработке и моделировании передовых микроэлектронных устройств, развивать инновационные технологии в схемотехнике (радиочастотные устройства, статическая утечка-свободные цепи) и инновационные архитектуры на системном уровне (сверхнизкомощные системы) [5].

2.2 Развитие технологий «больше чем Мур» (More than Moore)

Больше, чем Мур – новая область микро- и наноэлектроники, которая реализуется с помощью технологий за пределами традиционных полупроводниковых технологий и приложений. Это направление предусматривает создание и интеграцию различных нецифровых функциональных компонентов в цифровые микросхемы. Направление "Больше, чем Мур", мотивируемое новыми технологическими возможностями и неограниченным потенциалом практических приложений, сосредотачивается на создании большого числа микро- и наноэлектронных систем. Согласно этому направлению развития электроники, в одной микросхеме или корпусе необходимо интегрировать значительно большее число элементов, чем просто КМОП-компонентов. Многие приложения, такие как радиочастотные устройства, подсистемы управления мощностью, пассивные компоненты, биочипы, сенсоры, исполнительные механизмы и МЭМС играют важную роль в современных электронных устройствах. Интеграция аналоговых функций в специализированные КМОП-микросхемы позволяет реализовывать оптимизированные по стоимости системные решения. Устройства More than Moore представляют собой комплекс систем на кристалле со следующими вариантами интегрированных элементов: КМОП-логика, встроенная оперативная память, аналоговые интерфейсы, энергонезависимая память, процессорные микроядра МЭМС, НЭМС, сенсоры. Интегральные системы и гетерогенные системы этого типа открывают новые перспективы для систем безопасности (датчики движения, системы сигнализации) и коммуникации (беспроводные

системы связи, мобильные системы), медицинского оборудования, средств умного дома (интеллектуальные системы управления: климат-контроль, управление освещением и электропитанием, придомовая инфраструктура) и энергетики (альтернативные методы получения энергии) и др. На сегодняшний день уже сформирован огромный рынок, основанный на технологиях More than Moore. И этот рынок продолжает быстро расти. Изделия, выполненные по технологиям More than Moore – ключевые для Европы, и здесь уже существует технологическая база для их активного развития [5].

2.3 За пределами КМОП (Beyond CMOS)

За пределами КМОП. Согласно Международной технологической карте развития полупроводниковых приборов (International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS), к 2010 году планировалось освоить производство микросхем с топологическими нормами ~20 нм. Однако сегодня мировые гиганты полупроводниковой промышленности ведут разговоры о 22-нм технологическом процессе. Когда интегральные технологии выйдут за границы таких топологических размеров, новые устройства и вычислительные разработки потребуют замены и дополнения стандартных КМОП-устройств микросхемами сверхвысокой степени интеграции. Новые развивающиеся технологии переориентируют электронную промышленность на замену транзисторов на основе кремниевых нанопроводов наноразмерными молекулярными устройствами. Но в настоящее время нельзя не учитывать того факта, что электронные характеристики наноразмерных устройств чрезвычайно восприимчивы к малейшим изменениям таких свойств структуры и материала, как размер, шероховатость поверхности и дефекты. Сверхчувствительность электронных функций к физическим особенностям на наноразмерном уровне диктует серьезное требование не только к точности методологии, но и к специальному

оборудованию для разработки и проектированию наноматериалов и наноустройств [2]. Европейские лидеры полупроводниковой промышленности всячески пытаются избежать тупика, обусловленного физическим и технологическим пределами топологических норм размера микросхем. В то же время рынок электроники выдвигает новые и все более высокие требования. В связи с этим одним из перспективных направлений развития микроэлектроники являются нанотехнологии, которые требуют особого технологического оборудования, специальной инфраструктуры, а значит больших затрат. Технология "Больше Мура" экономически не оправдана и маловероятно, что она получит широкое распространение в мире. По этому пути идут лишь корпорации-гиганты, которые могут позволить большие объемы вложений капитала в новые производства. Приоритетным на сегодняшний день считается направление "Больше, чем Мур", которое позволяет на существующей технологической базе разрабатывать новые системы и устройства, отвечающие последним запросам рынка микроэлектроники [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Эрлих А. Кремниевая долина: Перспективы российской микроэлектроники — взгляд из Европы, 17 июня 2010, www.zelenograd.ru.
2. Declercq M. A passport for the future of IC design in Europe. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.— EURORACTICE Conference, Leuven, Belgium, Sept. 17, 2009.
3. Taylor G.F. Future of Analog Design and Upcoming Challenges in Nanometer CMOS. – Intel, 23rd international conference on VLSI Design, Bangalore, India, Jan.3–7, 2010.
4. Tuomi I. Future of Semiconductor Intellectual Property Architectural Blocks in Europe.— Report for the European Commission, Oy Meaning Processing Ltd., March, 2009.
5. Хэйер Д., Пятиренко А. Полупроводниковые технологии в Европе. Пути развития. ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес вып.6, 2010.