

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.382.049.77-022.532

Кремниевая транзисторная наноэлектроника

А.А. Орликовский

Физико-технологический институт РАН (г. Москва)

Проведен анализ кремниевой микроэлектроники как наиболее важной нанотехнологии в мире. Рассмотрены основные тенденции развития литографии при переходе к наноразмерным нормам. Проанализирована эволюция элементов конструкции МДПТ и влияния квантовых эффектов на их функционирование при длинах канала порядка 10 нм. Обсуждается роль квантовых эффектов при переходе в область приборов с суб-1 нм размерами.

Электронная промышленность на основе производства кремниевых интегральных схем (ИС) развивается с 1959 г. после их изобретения Джеком Килби (ныне лауреатом Нобелевской премии) и Робертом Нойсом. В 2000 г. передовые компании перешли рубеж 100 нм для минимального размера элементов транзистора и тем самым преодолели рубеж между микроэлектроникой и наноэлектроникой. Это событие сравнивают с «большим взрывом». Образ «большого взрыва» заимствован из космологии («большой взрыв», в результате которого родилась наша Вселенная). В результате «большого взрыва» микроэлектроники накопление огромного технологического опыта привело к рождению целого ряда новых направлений развития электроники: наноэлектроники, микро- и наноэлектромеханики, молекулярной электроники, магнитонаноэлектроники, оптонаноэлектроники, бионаносенсорики, полимерной наноэлектроники и других. В то время как многие из предложенных нанотехнологий лишь обещают оказать сильное влияние на развитие мирового сообщества, кремниевая микроэлектроника уже стала наиболее важной нанотехнологией в мире. Объем продаж изделий микроэлектроники к 1998 г. составил 1 трлн USD, а к 2010 г. он утроится, что примерно 10% мирового валового продукта [1].

Стремительное развитие микроэлектроники подчинялось закону Мура (экспоненциальное со временем увеличение числа транзисторов на кристалле). Это приводило к уменьшению стоимости на функцию электронной цепи. Например, стоимость памяти на бит уменьшалась вдвое каждые два года. Уменьшается также время переключения на функцию. С 1959 г. быстродействие интегральных схем улучшилось на 4 порядка. По мере уменьшения размеров уменьшались потребляемая мощность и энергия на каждую операцию переключения. Энергия на переключение с 1959 г. уменьшилась на 6 порядков. Число транзисторов на чип увеличилось в 10^8 раз.

Основную долю рынка (до 90% в настоящее время) интегральных схем, начиная с 1980 года, составляют ИС на МДП-транзисторах в конфигурации КМДП (комплементарные МДП, т.е. взаимодополняющие *p*-МДП и *n*-МДП-транзисторы, включенные последовательно в цепи «источник питания – точка с нулевым потенциалом»). Главное

преимущество таких схем заключается в том, что в любом из двух статических состояний («0» или «1») один из транзисторов закрыт, и ток в упомянутой выше цепи определяется током транзистора в выключенном состоянии $I_{\text{выкл}}$. Это означает, что, если $I_{\text{выкл}}$ пренебрежимо мал, ток от источника питания потребляется только в режиме переключения, а потребляемая мощность пропорциональна частоте переключения и может быть оценена простым соотношением:

$$P_{\Sigma} \approx C_{\Sigma} f U^2, \quad (1)$$

где C_{Σ} – суммарная емкость нагрузки на выходе логического элемента, f – частота переключения, U – напряжение питания. Практически вся потребляемая мощность выделяется в виде джоулева тепла, которое должно быть отведено от кристалла. При современных средствах отвода тепла можно достичь приблизительно 200 Вт на квадратный сантиметр площади кристалла. Если мы хотим оценить достижимую частоту в кристаллах сложностью N логических элементов, то из (1) $f \approx P_{\text{макс}} / C_{\Sigma} N U^2$. Для $N = 10^{11}$ (для длин канала порядка 10 нм), $P_{\text{макс}} = 1$ кВт, $U = 0,5$ В и $C_{\Sigma} = 1$ фФ $f = 40$ ГГц. Это значительно меньше собственной предельной частоты транзистора с длиной канала 10 нм (порядка 1 ТГц), но это достаточно много, чтобы создать суперкомпьютеры с очень высокой производительностью (более 10 петафлопс).

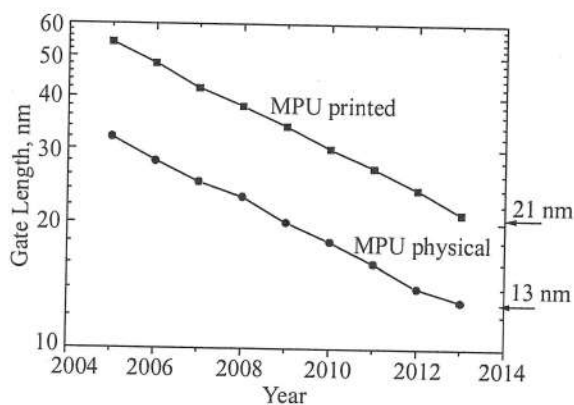


Рис. 1. Прогноз уменьшения длины затвора МДП-транзистора (ITRS 2005)

Критическими размерами в ИС являются минимальный размер (MP), воспроизводящийся в фоторезисте методом фотолитографии, и длина канала МДП-транзистора L_k . Обычно L_k удается сделать равным приблизительно 0,55 MP. На рис. 1 изображены зависимости изменения этих размеров по годам в соответствии с ITRS 2005 (International Technology Roadmap for Semiconductor – ежегодно обновляемый ведущими экспертами международный прогноз развития техники ИС). Видно, что MP, равный 22 нм, будет достигнут в производстве к 2013 г., при этом L_k составит 12 нм. Если

L_k равно 12 нм, то на кристалле можно разместить 10^{12} транзисторов. Долгосрочный прогноз предсказывает возможность создания гигантских интегральных схем на транзисторах с длиной канала до 6 нм, но этот диапазон (6–12 нм) требует отдельного обсуждения.

Литография. В настоящее время передовыми компаниями уже освоено производство с MP 65 нм, при этом L_k равна 35 нм. Столь малые MP достигаются методом оптической литографии [2]. Хотя стоимость оптических литографических машин с 1965 г. увеличилась от 10 тыс. долл. до 35 млн долл., а стоимость высокопроизводительного производства возросла до 2–3 млрд долл. США к настоящему времени, стоимость транзистора за это же время уменьшилась на семь порядков величины. Таким образом, главным стимулом развития микроэлектроники является экономика.

В современных производствах доминируют высокопроизводительные (100 пластин/ч) проекционные (с уменьшением 4:1) степеры-сканеры (пошаговое экспонирование изображения на чип со сканированием светового пятна в пределах одного чипа) с эксимерными лазерами в области глубокого ультрафиолета в качестве источников све-

та. Это в настоящее время лазеры на KrF (248 нм) и на ArF (193 нм). Первый отечественный stepper с источником света на длине волны 248 нм был создан в конце 80-х годов минским предприятием «Планар» под научно-методическим руководством Физико-технологического института РАН и лично академика РАН К.А.Валиева. К сожалению, литограф не был установлен в каком-либо из отечественных производств, что связано с проблемами, возникшими в связи с перестройкой.

Разрешение процесса литографии (достижимый МР) определяется из известной формулы Релея

$$R = k_1 \lambda / NA, \quad (2)$$

в которой k_1 – коэффициент Релея, λ – длина волны, NA – числовая апертура объектива.

Коэффициент Релея ограничивается несовершенством систем изображения, в том числе дифракционными эффектами, и несовершенством регистрирующей среды. Постоянное совершенствование объективов, чувствительности и контрастности фоторезистов, процесса экспонирования и проявления позволило в современных степперах достичь $k_1 = 0,35 - 0,25$, $NA = 0,85 - 0,95$. Для предельного расчета и $\lambda = 193$ нм получим $R = 50$ нм, т.е. почти в 4 раза меньше длины волны. Постоянное улучшение разрешения [3] достигается оптимальной коррекцией шаблонов, применением фазовых шаблонов, оптимальным выбором резистов (многослойных, с высокими коэффициентами преломления n , с химическим усилением и т.д.), применением внеосевых источников освещения, линз из материалов с высокими n (линзы из кварца с $n = 1,56$ могут быть заменены объективами из алюмо-лютециевого граната (LuAG) с $n = 2,1$) и, наконец, использованием поляризованного света.

Радикальное увеличение NA дает применение иммерсии. В зазор между объективом и пластиной постоянно подается и отбирается жидкость. Поскольку числовая апертура пропорциональна коэффициенту преломления среды n между объективом и пластиной, NA увеличивается в n раз. При использовании воды ($n = 1,436$ на длине волны 193 нм) $NA = 1,2 - 1,35$. Возможно применение жидкостей с $n = 1,6; 1,8$ (жидкие полимеры, добавки наночастиц, солей, кислот к воде и т.д.). В этих случаях возможно достижение так называемых гипер- NA , равных 1,4–1,75, и разрешения 32 нм, а это означает шестикратное улучшение разрешения по отношению к длине волны. Нужно помнить при этом, что с увеличением NA катастрофически уменьшается доступная глубина фокуса

$$DOF = k_2 \lambda / NA^2. \quad (3)$$

Так, для разрешения $R = 45$ нм доступная глубина фокуса составляет 150 нм, а для $R = 32$ нм всего лишь 100 нм.

В иммерсионных степперах-сканерах возникают также новые источники дефектов, такие как пузырьки, капли и др. Требования к жидкостям для применения в литографических машинах являются чрезвычайно жесткими. Процесс подачи и отбора жидкости в зазоре между линзой и пластиной должен создавать исключительно ламинарное течение, жидкость должна обладать высокой прозрачностью на длине волны 193 нм ($\geq 90\%/мм$), высокой термической и химической стабильностью, низкой вязкостью, не допускается возможность химического взаимодействия с материалом линзы, резистом и другими материалами системы. Хотя все это создает большие проблемы разработчикам жидкостей для иммерсионных литографов, продвижение в создании новых жидких материалов значительно. Обозначены рубежи для такого продвижения, в частности, жидкие материалы 2-го ($n \geq 1,6$) и третьего ($n \geq 1,8$) поколений, которыми должна быть заменена вода [4].

Определенные надежды возлагались на применение эксимерных лазеров на F_2 в качестве источников света на длине волны 157 нм. На этой длине волны кварц является не прозрачным, и в качестве материалов линз необходимо применение CaF_2 . На фоне интенсивного развития иммерсионной литографии на 193 нм у литографии-157 остаются проблемы, а именно, качество фторида кальция (достижение высокой оптической однородности) и выбор резиста. Применение иммерсии в литографах на такой длине волны остается проблематичным. Хотя в развитие литографии-157 вложены большие средства, будущее ее применения не определено и, возможно, является бесперспективным.

Компания Интел, которая славится тем, что развивает свои производства в ритме закона Мура для сложнейших изделий микроэлектроники – микропроцессоров, намерена продлить жизнь иммерсионной литографии-193 в производстве вплоть до 16 нм. Можно с уверенностью утверждать, что на производствах ИС с МР 32 нм будут использоваться иммерсионные литографы на 193 нм. Это подтверждается и работами по технологии литографии фирмы IBM.

Дальнейшее уменьшение МР возможно применением оптической литографии на длине волны 13,5 нм (мягкий рентген или экстремальный ультрафиолет, ЭУФ). На этой длине волны света невозможно использовать преломляющую оптику из-за интенсивного поглощения такого света всеми материалами. Поэтому в таких системах используют отражающую оптику на рентгеновских зеркалах. При использовании современных методов нанесения многослойных покрытий с чередующимися слоями Mo-Si удается получить коэффициент отражения до 70%, что позволяет строить объективы с 4–6 зеркалами. Шаблоны также становятся отражающими. Потери излучения требуют создания источника излучения на длине волны 13,5 нм с оптической мощностью свыше 115 Вт.

Главными аргументами развития ЭУФ-литографии (ЭУФЛ) являются следующие. Во-первых, ЭУФЛ является проекционной оптической и использует стеклянные заготовки для шаблонов. В отличие от ионной, электронной (в том числе многолучевой) или импринт ЭУФЛ не требует создания новой инфраструктуры и обеспечивает высокую производительность. Эксперты фирмы Интел называют импринт-литографию «разрушающей» из-за необходимости в случае ее применения резкого изменения инфраструктуры производства шаблонов и всей технологии литографии. Главная цель – продвинуть оптическую литографию как можно дальше, не используя более дорогие альтернативы без абсолютной необходимости. Во-вторых, ЭУФЛ может быть использована для нескольких поколений ИС (для $k = 0,4$ и $NA = 0,25$ $R = 22$ нм, а для предельного расчета с $NA=0,45$ достижимо $R = 10–12$ нм), в частности, для диапазона минимальных размеров 32–12 нм. И, в-третьих, работоспособность ЭУФЛ уже продемонстрирована на прототипах литографов. Внедрению ЭУФЛ будут предшествовать работы по достижению нужной оптической мощности источника (необходимо 115 Вт, пока достигнуто 20–30 Вт), разработка ультраплоских подложек для масок с очень низкой плотностью дефектов, разработка транспортной системы масок, разработка резистов, отвечающих требованиям по разрешению, чувствительности и ширине шероховатости края. Проблематичным кажется возможность применения фазовых шаблонов, так как ошибка в изменении рельефа шаблона на величину 0,11 нм дает сдвиг фазы на 6 градусов. Эта оценка дает представление о необходимой точности воспроизведения рельефа фазового шаблона. Промышленный ЭУФ-литограф планируется создать в 2007–2009 гг. (ASML). Его стоимость не сильно превысит стоимость иммерсионного литографа и составит 25–30 млн долл. Следует отметить, что и в России сделаны крупные научно-практические заделы по ЭУФЛ в ИФМ РАН, ФТИ им. А.Ф.Иоффе и др., что обеспечивает возможность создания отечественного оборудования

столь высокого уровня и позволит «успеть вскочить на подножку столь быстро идущего поезда мировой электронной промышленности», не только закупая иностранное оборудование, но используя и свои разработки, развивая тем самым и отечественное электронное машиностроение.

Эволюция МДП-транзистора. Законы масштабирования МДПТ (рис.2) требуют, чтобы при уменьшении его размеров в плоскости кристалла должны быть уменьшены его размеры по глубине. Это относится, прежде всего, к толщине подзатворного диэлектрика и к глубине залегания p - n -переходов. Уже при МР, равных 65 нм, толщина окисла должна быть равной 1 нм, что недопустимо из-за неприемлемо высоких токов туннелирования через тонкий диэлектрик. Эта проблема решается применением диэлектриков с высоким ϵ (исследуются возможности применения HfO_2 , ZrO_2 , ZrSiO_4 , HfSiO_4 , Si_3N_4 , Al_2O_3 и др.). Например, для HfO_2 $\epsilon = 25$, тогда необходимая толщина диэлектрика $d_{\text{HfO}_2} = d_{\text{эКВ}} \epsilon_{\text{HfO}_2} / \epsilon_{\text{SiO}_2} \approx 6$ нм (для обсуждаемого примера), что обеспечивает ничтожно малые туннельные токи через диэлектрик. Критерии выбора подзатворного диэлектрика многообразны. Это достаточно большая величина ϵ , высокая термическая стабильность, возможность наращивания сплошных и однородных слоев толщиной несколько нанометров, удовлетворительное взаимное расположение запрещенных зон диэлектрика и кремния (высота барьеров для электронов и дырок не менее 1 эВ, например для HfO_2 и HfSiO_4 1,5 и 3,4 эВ соответственно), отсутствие реакции с кремнием, удовлетворительная граница раздела с кремнием (дефекты, встроенный заряд и т.п.) [5].

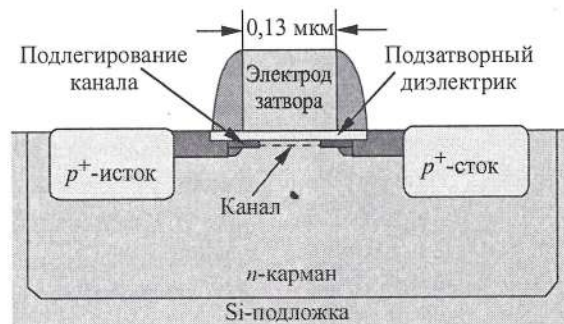


Рис.2. Структура МДП-транзистора

Нужно также учитывать, что в режиме инверсии подзатворный диэлектрический слой как бы утолщается, во-первых, из-за того, что максимум плотности подвижных носителей в канале отстоит от границы кремний–диэлектрик на величину около 0,3 нм (такую оценку дает совместное решение уравнений Шредингера и Пуассона), и, во-вторых, из-за образования области обеднения (> 1 нм) в легированном поликремниевом затворе на границе с диэлектриком. Кроме того, из-за отсутствия возможности в нужной степени легировать поликремниевый затвор не удается получить малые сопротивления затвора. В n -МДПТ поликремниевый затвор легируется бором, атомы которого способны диффундировать через подзатворный диэлектрик в канал. По этим причинам разрабатываются технологии замены поликремниевых затворов на металлические. Требования к материалам металлических затворов достаточно сложны. Кроме высокой проводимости и термической стабильности, высокой адгезии и низкой реактивности (недопустимо окисление) металлический электрод должен обладать необходимой работой выхода электронов. Поскольку в КМОП-схемах совмещены транзисторы двух типов (n и p), и их необходимо симметризовать, нужны два типа электродов с разными

работами выхода 4,1 – 4,4 эВ и 4,8 – 5,1 эВ [6]. Например, в работе [7] использованы Ta (с работой выхода 4,3 эВ на HfSiO_4) для *n*-МДПТ и TiN (4,9 эВ) для *p*-МДПТ.

Привлекательно использование силицидов металлов, что расширяет спектр возможностей для технологов. Например, силицид никеля NiSi имеет низкую температуру образования (450 °С), низкое сопротивление (15 мкОм/см), не реагирует с двуокисями кремния и гафния. Этот силицид является метастабильной фазой из числа соединений никеля с кремнием и при относительно невысоких температурах (> 700 °С) переходит в стабильную фазу дисилицида никеля NiSi₂, имеющего существенно большее сопротивление. Поэтому при использовании силицида никеля необходимо ограничение температурного бюджета каких либо последующих технологических процессов производства ИС. Необходимы интенсивные исследования МДПТ с металлическими затворами.

Глубина залегания *p-n*-переходов стока и истока должна быть равной примерно 0,5 L_k . Это достигается имплантацией ионов примеси при малых ускоряющих напряжениях (0,1–1 кВ). При таких напряжениях ток ионов в традиционных имплантерах с системами сепарации ионов падает до 10^{-6} – 10^{-5} А/см², что катастрофически увеличивает время набора дозы, т.е. ухудшает производительность. Проблема может быть решена применением плазменно-иммерсионных ионных имплантеров (ПИИИ) [8] на основе широкоапертурных источников плотной плазмы (с плотностью до 10^{12} см⁻³). В этом случае плотность тока может быть увеличена до 10 мА/см² по порядку величины, а

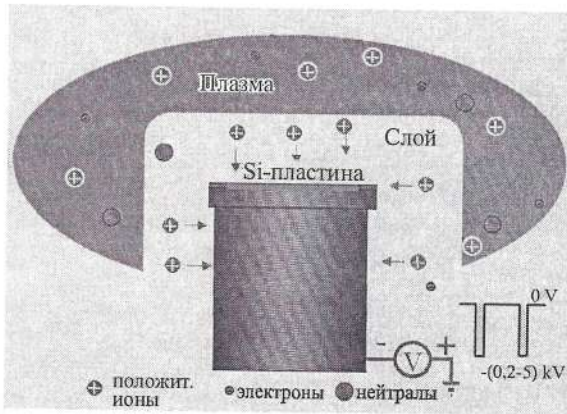


Рис.3. Плазменно-иммерсионная ионная имплантация. Иллюстрация принципов

время набора дозы снижено до долей минуты. Принцип работы такого имплантера прост (рис.3). На подложку подается импульсное смещение, амплитуда которого равна ускоряющему напряжению. Вокруг пластины формируется область пространственного заряда. Давление в камере избирается таким образом, чтобы ионы преодолевали область пространственного заряда без столкновений. Тогда ионы внедряются в приповерхностный слой кремния с энергией, ограниченной созданным смещением. Впервые в отечественной практике плазменно-иммерсионный ионный имплантер создан в Физико-технологическом институ-

те РАН (ФТИАН), на котором получены высокая равномерность и производительность процесса легирования мелко залегających *p-n*-переходов [9].

Плазменные процессы играют большую роль в полупроводниковых производствах. Если процессы литографии повторяются в производстве ИС приблизительно 25 раз, то после каждой из литографий следует один или более плазменный процесс. Это изотропное или анизотропное травление кремния и кремнийсодержащих диэлектриков, процессы осаждения диэлектрических или полупроводниковых тонких слоев с заданными свойствами, процессы очистки поверхности пластины от органических загрязнений и атомов тяжелых металлов, стабилизации и снятия резиста, частичной планаризации рельефа пластины и, наконец, имплантации [10]. Автоматизированные установки для реализации этих процессов созданы во ФТИАН. Это, как и в случае с ЭУФ-литографом, позволит при создании новых отечественных производств избежать закупок этого класса оборудования в иных странах.

Правила масштабирования МДПТ требуют увеличения степени легирования канала, что предотвращает смыкание областей пространственного заряда стока и истока, но приводит к снижению подвижности носителей в канале из-за рассеяния электронов и дырок на атомах примеси и, следовательно, к снижению тока транзистора в открытом состоянии $I_{вкл}$. Увеличить ток возможно, использовав тонкие слои напряженного кремния [11]. В производствах с МР 90 и 65 нм для транзисторов на объемной подложке используются локальные напряжения, например, локальное сжатие кремния в области канала *p*-МДПТ селективным эпитаксиальным заращиванием «кремний-германием» вытравленных предварительно областей стока и истока. При содержании Ge около 17% $I_{вкл}$ *p*-МДПТ увеличивается на 30%. При этом для *n*-МДПТ необходимо достичь одноосного растяжения решетки кремния в канале по линии тока. Это обеспечивается, например, нанесением сильно напряженной пленки нитрида кремния над *n*-канальным транзистором, что увеличивает ток $I_{вкл}$ на 10%. Поскольку любой из процессов вносит тот или иной уровень напряжений в приповерхностные слои кремния, оптимизация технологического процесса становится сложной задачей, и без того сложный процесс производства интегральных схем дополнительно усложняется.

Радикальное улучшение свойств обоих типов транзисторов дает биаксиальное растяжение в плоскости кристалла. Это объясняется тем, что в условиях биаксиального растяжения зонная структура кремния изменяется, в частности, это приводит к подъему четырехкратно вырожденных эллипсоидов с высокой эффективной массой электронов и к снижению двукратно вырожденных эллипсоидов с низкой эффективной массой. В результате большинство электронов удерживается в долинах с низкой эффективной массой при более низких энергиях, а междолинное рассеяние уменьшается. В валентной зоне биаксиальное растяжение увеличивает вырождение «тяжелые дырки/легкие дырки» в точке Г, что приводит к уменьшению эффективной массы дырок для транспорта в плоскости кристалла и уменьшению междолинного рассеяния. При этом подвижность электронов увеличивается более чем вдвое, а дырок – почти на 50%.

Предложен ряд технологических маршрутов получения напряженных кремниевых слоев, основанных на эпитаксиальном росте кремния на релаксированных слоях Ge–Si. Результирующие структуры относятся к технологии КНИ (кремний на изоляторе), переход к которым вероятнее всего неизбежен для МР < 45 нм.

В таблице отражены вероятные изменения технологии и материалов в структуре МДП по мере уменьшения МР.

Изменение технологии и материалов (прогноз)

Поколение ИС	65 нм	45 нм	32 нм	22 нм
Технология	Объемная подложка. Одноосные напряжения	Напряженный КНИ. Биаксиальные напряжения	Напряженный КНИ. Сверхтонкий КНИ	Сверхтонкий КНИ
Затвор	Поликремний	Поликремний	Металлы, силициды	Металлы, силициды
Подзатворный диэлектрик	SiON	SiON/ HfO ₂ и др.	HfO ₂ или др.	HfO ₂ или др.

Применение тонких слоев КНИ [12] позволяет существенно снизить уровень токов утечки, исключить влияние короткоканальных эффектов, уменьшить паразитные емкости и при длинах канала порядка 10 нм вообще отказаться от легирования канала. При таких длинах канала реализуется баллистический перенос носителей через область канала. Заметим, что в баллистических транзисторах с малой длиной канала понятие подвижности

теряет смысл, так как электрон пролетает канал без столкновений. Тем не менее выигрыш от применения напряженного кремния может быть значительным благодаря уменьшению эффективной массы электронов. Кинетическое моделирование [13] показывает, что ток увеличивается втрое при изменении эффективной массы от значения $m = 0,98m_0$ до $m = 0,18m_0$. Влияние эффективной массы на ток обусловлено тем, что более легкие электроны быстрее пролетают канал. Кроме того, от эффективной массы также зависит функция распределения электронов и уровень Ферми в контакте, следовательно, изменение эффективной массы приводит к изменению распределения инжектируемых частиц по скоростям.

Квантовые эффекты в МДПТ в тонком КНИ. При длинах канала порядка 10 нм МДПТ становится квантовым [14]. Электрон преодолевает канал *баллистически* как волна Де Бройля. Если бы граница «канал–сток» была резкой, необходимо было бы учесть *продольное квантование*, возникающее из-за отражения волны на этой границе и интерференции падающей и отраженной волн.

Использование тонких слоев кремния в качестве канала обязывает учесть *эффекты поперечного квантования*. Энергия поперечного квантования электрона в тонком слое КНИ вносит вклад в величину порогового напряжения. Величина поправки может быть оценена как энергия наименьшего состояния поперечного квантования в канале

$$E_0 = (\hbar\pi)^2/2m(d_{Si})^2. \quad (4)$$

Для тонких слоев (порядка 10 нм и меньше) и $m = 0,33m_0$ эта поправка невелика по сравнению с типичными пороговыми напряжениями (0,5 В) и составляет 10 мэВ. Это сдвиг не только порогового напряжения, но и напряжения выключения МДПТ, что может вызвать существенное изменение подпорогового тока. Поперечное квантование может играть существенную роль при учете *поверхностного рассеяния*. Квантовый расчет дает исключительно высокие степени зависимости интенсивности рассеяния от d_{Si} вплоть до d_{Si}^{-6} в зависимости от характера шероховатости. Поверхностное рассеяние может существенно уменьшить токи КНИ-нанотранзисторов. Чтобы избежать этого нужны весьма совершенные атомно-слоевые технологии. Впрочем не только для получения тонких слоев кремния, но и подзатворных диэлектриков.

Наиболее существенным является возможность *прямого туннелирования электронов между стоком и истоком*, когда транзистор выключен. Величина этого тока может быть оценена из выражения

$$I_T \sim \exp\{-2(2mU_b/\hbar W^2)^{1/2}\}, \quad (5)$$

в котором U_b – высота барьера над уровнем Ферми в контактах, W – ширина барьера. Термоэмиссионный ток I_{TE} в закрытом состоянии транзистора, когда уровень Ферми в контактах ниже высоты потенциального барьера оценим с помощью выражения

$$I_{TE} \sim \exp\{-(U_b/kT)\}. \quad (6)$$

Условие преобладания I_T над I_{TE} легко получить из (5) и (6):

$$W < (\hbar^2 U_b / 8mkT)^{1/2}. \quad (7)$$

Для $I_{TE}(I_{\text{выкл}}) = 10^{-9}$ А/мкм, $U_b/kT = 20$ ширина барьера или длина канала $W (L_k) < 12$ нм. Заметим, что наблюдавшаяся в эксперименте величина $I_{\text{выкл}}$ при длине канала 5 нм составила 10^{-6} А/мкм [15].

Частота и потребляемая мощность КМОП ИС. Полученный результат обязывает уточнить формулу (1), а именно, учесть токи утечки и ток прямого туннелирования

$$P_{\Sigma} \approx C_{\Sigma} f(U)^2 + (I_{ут} + I_{выкл})U, \quad (8)$$

где $I_{ут}$ – токи утечки, включая ток прямого туннелирования, $I_{выкл} \sim \exp(-eV_{пор}/kT)$ – ток транзистора в выключенном состоянии (подпороговый участок ВАХ МДПТ).

В соответствии с прогнозом ITRS 2001 предполагалось, что напряжение питания при МР 22 нм можно будет снизить до 0,4 В, но в прогнозе ITRS 2003 предполагаемая цифра увеличена до 0,8 В из-за больших флуктуаций пороговых напряжений. Пороговые напряжения существенно снижать нельзя из-за экспоненциального роста $I_{выкл}$. Давайте выполним две оценки для схем на МДПТ с длинами канала 12 и 5 нм. Ширину каналов выберем равными 50 и 20 нм соответственно. Предположим в этих случаях, что число транзисторов станет равным 10^{11} и $5 \cdot 10^{11}$ соответственно. Простой расчет статической мощности (второй член в выражении (8)) дает для первого случая 4 Вт, а для второго – 8 кВт(!). Видно, что последнее совершенно не допустимо.

Если принять $P_{ст} \leq 0,1P_{\Sigma}$, площадь кристалла 4 см^2 , МР = 22 нм (длина канала 13 нм), число логических элементов 10^{10} , $P_{\Sigma} = 800 \text{ Вт}$, то максимальная частота $f_{\max} \leq 100 \text{ ГГц}$. Это так называемые «high performance integrated circuits (HPIC)», т.е. интегральные схемы с предельно высокими характеристиками, в которых благодаря эффективному отводу тепла (струи жидкого газа с его последующей регенерацией) достигается максимальная частота. Для воздушного охлаждения целесообразно принять $P_{\Sigma} = 80 \text{ Вт}$, тогда $f_{\max} \leq 10 \text{ ГГц}$. Поэтому продвижение в область все меньших длин канала в суб-10 нм диапазон неизбежно приводит к потерям в стремлении достичь предельно высоких характеристик. В последнем ITRS 2005 есть прогнозные оценки для схем на транзисторах с длиной канала 6 нм (но не меньше), но в суб-10 нм диапазоне уже не идет речи о HPIC.

Суб-10 нм диапазон минимальных размеров. Таким образом, транзистор с длиной канала меньше 10 нм становится туннельным, током которого можно управлять, меняя высоту барьера напряжением на затворе. Критическим вопросом для туннельных приборов всегда была воспроизводимость тока во включенном состоянии. Окажется ли приемлемым для применений в ультрабольших ИС туннельный МДПТ при новых технологических возможностях?

Область суб-10 нм размеров (область мезоскопических приборов) требует поиска новых приборов и новых методов литографии, способных претендовать в будущем на устойчивость к массовому производству. Нанотрубки и квантовые нити (например, кремниевые) пока не могут быть использованы в транзисторных интегральных схемах из-за отсутствия технологии их размещения на кристалле в заданных местах и с необходимой точностью ($\pm 10\%$). Одноэлектронные транзисторные схемы требуют литографических методов, позволяющих создавать проводящие островки размерами 1–3 нм с той же точностью воспроизведения их размеров ($\pm 10\%$). Можно предположить, что молекулы, обладающие высокой идентичностью размеров (например, ДНК – 2,5 нм), являются наиболее предпочтительными элементами будущих молекулярных устройств обработки информации, но архитектура этих устройств не должна повторять архитектуру транзисторных схем. На этом пути уже видны ограничения (например, туннельные токи).

В области суб-1нм размеров наступает эра квантовых приборов, например одноатомных транзисторов, и кубитов (квантовых битов) – элементов квантовых компьютеров [16].

Упомянутый выше закон Мура заключается в экспоненциальном уменьшении объема вещества на один бит информации. Пределом закона Мура, по всей видимости, является отдельный атом, если он выполняет функцию отдельного бита. В отличие от мезоструктурных приборов, в том числе транзисторов с каналом порядка 10 нм, в которых квантовые явления играют существенную роль, но которые остаются объектами классическими (макроскопическими), атом является объектом квантовым, а для кодирования логической операции или операции памяти используются такие степени свободы атома (квантовые переменные), как энергия, координаты, заряд или магнитный момент. Для создания кубитов нужны технологии атомного масштаба (0,5–0,1 нм). Экстраполяция тенденции уменьшения размеров приборов (обсуждавшийся выше закон Мура) показывает, что одноатомные размеры будут достигнуты в производстве в 2030 г. Этот период станет эрой производства квантовых микросхем, работающих на квантовых принципах.

Литература

1. *Vasileska D., Khan H.R., Ahmed S.S.* // Int. J. of Nanoscience. – 2005. – 4, 305.
2. *Валиев К.А.* Физика субмикронной литографии. – М.: Наука, 1990. – 528 с.
3. *Валиев К.А., Ивин В.В., Кудря В.П., Махвиладзе Т.М.* В кн.: Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника // Тр. ФТИАН. / *Ред. А.А. Орликовский.* – М.: Наука, 2005. – 18, 219.
4. *Sh.Peng, R.H.French, W.Qiu et al.* // Proc.SPIE. – Vol. 5754 (SPIE. Bellingham, WA, 2005). – 2005.
5. *Лебединский Ю.Ю., Пушкин М.А., Баранцев Н.С., Неволин В.Н.* Вопросы термической стабильности сверхтонких слоев оксидов металлов с высоким ϵ (*high- κ dielectrics*) в контакте с Si. // Всероссийский семинар «Перспективные технологии и устройства микро- и наноэлектроники». ФТИАН. 2006.
6. *Лебединский Ю.Ю., Зенкевич А.В., Баранцев Н.С., Неволин В.Н.* Поиск материалов для металлических затворов в перспективных КМОП-приборах // Всероссийский семинар «Перспективные технологии и устройства микро- и наноэлектроники». – ФТИАН. – 2006.
7. *К. Takahashi et al.* // Jap.J.Appl.Phys. – 2003. – 44, 2210.
8. Handbook of plasma immersion ion implantation / *Ed. A.Andersen.* – N.Y.: Wiley, 2000. – 736 p.
9. Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника / *С.Н.Аверкин и др.* / Тр. ФТИАН. / *Ред. А.А. Орликовский.* – М.: Наука, 2005. – 18, 121.
10. *Орликовский А.А.* Плазма в субмикронной технологии микроэлектроники. В кн.: Энциклопедия низкотемпературной плазмы / *Ред. В.Е.Фортков.* – М.: Наука, 2000. – Т. IV. – С. 370.
11. *Wong H.-S.Ph.* // Solid-State Electronics. – 2005. – 49, 755.
12. *Celler G.K., Cristoloveanu S.* // J. Appl. Phys. – 2003. – 93, 4955.
13. *Вьюрков В.В., Орликовский А.А., Сидоров А.А.* // Микроэлектроника. – 2003. – 32, 283.
14. *Сидоров А.А., Вьюрков В.В., Орликовский А.А.* В кн.: Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника // Тр. ФТИАН. М.: Наука / *Ред. А.А. Орликовский.* – 2005. – 18, 327.
15. *J.Lolivier et al.* // Intern.SOI Conf.Proc. Hawaii. IEEE. – 2005. – P. 26
16. *Валиев К.А.* Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // УФН. – 2005. – Т. 175, № 1. – С. 3.

Статья поступила
9 октября 2006 г.

Орликовский Александр Александрович – академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Физико-технологического института РАН. *Область научных интересов:* технология и приборы микро- и наноэлектроники.