

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

УДК 621.382

ЗАКОНУ МУРА — 40 ЛЕТ: АКАДЕМИЧЕСКИЙ ФОРУМ 2005 КОРПОРАЦИИ INTEL В г. ГДАНЬСКЕ (ПОЛЬША)

© 2005 г. А. В. Двуреченский
ИФП СО РАН

Проанализированы проблемы, возникающие при уменьшении размеров элементов в современных электронных схемах нанометрового масштаба. Подчеркнуто, что для характерных размеров элементов ~10 нм необходима разработка новых подходов в решении задач нанoeлектроники — подходов, основанных не на протекании в структуре тока (как в настоящее время для большинства приборов), а на эффектах межчастичного (межъядерного) взаимодействия: переориентация спинов (или полного магнитного момента), переориентация электрических диполей.

В 2005 г. исполнилось 40 лет закону Мура, согласно которому в течение последних сорока лет число приборов (полевых транзисторов) в интегральных схемах на единичный кристалл (чип) увеличивается экспоненциально со временем, удваиваясь каждые 2—3 года. Характерный размер транзистора также уменьшается экспоненциально со временем. Движущей силой этого процесса является естественное требование увеличения быстродействия и объема памяти компьютерной техники. Однако процесс масштабирования не может продолжаться бесконечно. Принципиальным ограничением становятся свойства материалов. Уменьшение размеров и повышение плотности упаковки элементов в схемах вызвало значительный рост длины межсоединительных электрических проводников, что привело к необходимости решения проблемы замены алюминиевых проводников (использовавшихся в интегральных схемах более 40 лет) медными, имеющими более высокую проводимость. При такой замене были решены непростые проблемы предотвращения диффузии меди в кремниевые приборы.

Ограничение частотных характеристик из-за емкости между проводниками электрической развод-

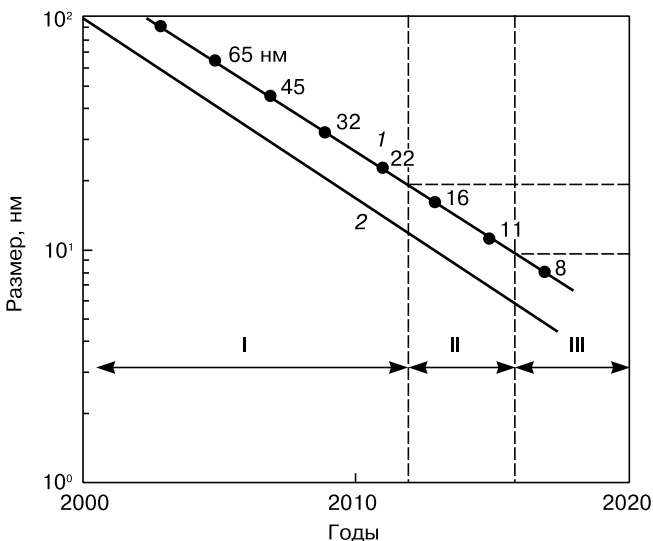
ки (RC -задержка) приводит к необходимости решения задачи синтеза диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью. Но еще более серьезная проблема возникла для подзатворного диэлектрика в полевых транзисторах. Используемая (и необходимая) толщина подзатворного диэлектрика SiO_2 в современных полевых транзисторах составляет ~2 нм. В результате ток затвора, вследствие прямого туннелирования носителей через диэлектрик, оказывается достаточно большим (превышает 1 А/см^2 при напряжении 1 В), и рассеиваемая мощность в схеме возрастает до неприемлемых значений. Магистральное направление решения этой проблемы связано с заменой подзатворного SiO_2 (диэлектрическая проницаемость — 3,9) на диэлектрики с более высокой диэлектрической проницаемостью (5—30). К ним относятся, например, диоксиды гафния, циркония. В СО РАН работы по синтезу диэлектриков с большими и малыми значениями диэлектрической проницаемости проводятся в Институте неорганической химии. Физический механизм действия диэлектриков с большим значением диэлектрической проницаемости заключается в следующем. Туннельный ток уменьшается экспоненциально

с ростом толщины диэлектрика. Затворную емкость можно выразить как $C = \epsilon_0 \epsilon A/d$, где ϵ_0 — электрическая постоянная; ϵ — диэлектрическая проницаемость; A , d — площадь и толщина диэлектрика соответственно. Следовательно, замена SiO_2 более толстым диэлектриком с большим ϵ обеспечивает сохранение емкости при значительном подавлении туннельного тока.

На прошедшем (17—20 мая 2005 г.) в г. Гданьске (Польша) десятом по счету Академическом форуме такой путь развития полупроводниковой электроники отнесли к эволюционному развитию КМОП-технологии (**КМОП** — кремний—металл—оксид—полупроводник). Характерный размер (проектная норма), освоенный в настоящее время передовыми производственными полупроводниковыми корпорациями, составляет 65 нм. Проектная норма 45 нм прошла стадию разработки и готова для промышленного освоения. В разработке находится технология с проектной нормой 32 нм. Нижним пределом по проектной норме для эволюционного пути развития КМОП-технологии считается размер ~20 нм, который может быть достигнут в 2012 г. (рисунок).

В области меньших размеров (10—20 нм) прогнозируется (в который раз) «покушение» на монополию кремния в полупроводниковой электронике и ожидается использование для КМОП-технологии таких материалов, как углеродные нанотрубки, соединения $A^{III}B^V$. Эту область размеров планирует освоить до 2017 г.

Что касается области размеров меньше 10 нм, то специалистами корпорации Intel перед академическим сообществом поставлена задача создания принципиально новых приборов, основанных не на протекании в структуре тока (как в настоящее вре-



Достигнутое и прогнозируемое изменение характерного размера элементов наноэлектроники (1) и длины канала полевого транзистора L_{GATE} (2) по годам. Область I — эволюционный этап развития КМОП-технологии; область II — революционный этап с переходом на нанотрубки, квантовые проволоки, материалы $A^{III}B^V$; область III — этап отказа от протекания тока в структурах

для большинства приборов), а на эффектах междолинного (междолинного) взаимодействия: перераспределение спинов (или полного магнитного момента) и электрических диполей. Ожидают также новых нестандартных решений. Нижним пределом здесь считается размер 1,5 нм, ниже которого закон Мура перестанет действовать.

Важнейшей составляющей современных как дорогостоящих (компьютеры, принтеры, автомобили и т. д.), так и недорогих устройств массового сбыта (электронные, в том числе банковские карты, мобильные телефоны, плееры, игрушки, цифровые фотоаппараты, видеокамеры и т. д.) являются приборы памяти. Использование новых материалов позволяет принципиально продвигаться в решении проблемы создания новых приборов памяти, дающих выигрыш в габаритах, емкости и быстродействии. Электрически перепрограммируемые постоянные запоминающие устройства (**ЭПЗУ**) используют как энергонезависимые элементы памяти. Такие приборы включают плавающий затвор, обеспечивающий в нем накопление заряда. Заряд может инжектироваться на плавающий затвор или удаляться с него внешним напряжением. В качестве плавающего затвора используют слои легированного поликремния. При переходе к тонким диэлектрикам возникают проблемы утечек, ограничивающих время хранения заряда (информации). Перспективным подходом в решении этой проблемы, обсуждавшейся на форуме, считается переход от сплошного плавающего затвора к дискретным фазовым включениям большой плотности (структуры с квантовыми точками). При этом предпочтение отдается технологиям, обеспечивающим формирование плотного массива квантовых точек в одной плоскости, параллельной подложке (в отличие от технологий, дающих распределение нанокластеров по объему диэлектрика). В СО РАН работы по разработке методов формирования, исследования атомной и электронной конфигурации единичных квантовых точек и характеристик их массива проводятся в Институте физики полупроводников.

В настоящее время на рынке кремниевых приборов доминирует ЭПЗУ ФЛЭШ-память — особый вид перепрограммируемой быстродействующей, энергонезависимой, полупроводниковой памяти. Этому виду памяти были посвящены на форуме специальные доклады. Энергонезависимая память означает, что не требуется дополнительной энергии для хранения информации (энергия нужна только для перепрограммирования). Полупроводниковая (твердотельная) память означает, что устройство не содержит механически движущихся частей и построено на основе интегральных микросхем. Перспективные приборы ФЛЭШ-памяти основаны на эффекте локализации электронов и дырок на ловушках в аморфном нитриде кремния Si_3N_4 .

Для обеспечения прогресса в области меньших размеров специалисты корпорации Intel считают необходимым решение задачи разработки приборов памяти на основе новых подходов — фазовых переходов, полимерных пленок с магнитными добавками (кластерами). Отказ от протекания тока в структуре здесь также является ключевым фактором.



Тенденция к повышению быстродействия компьютерной техники порождает предложения по замене электрической разводки в виде металлических проводников световыми волноводами. В этой области, именуемой фотоникой, основными узлами схем являются излучатель, волноводы и модуляторы света и фотоприемники. Так как кремний продолжает оставаться основным материалом полупроводниковой электроники, то необходимо, чтобы все перечисленные выше элементы фотоники могли быть изготовлены на кремнии. Сложность здесь заключается в создании излучателя, поскольку кремний, являющийся по энергетической струк-

туре непрямозонным материалом, характеризуется низкой эффективностью излучения. В последние годы стремление найти пути решения задачи создания лазера на основе кремния породило конкурентную мировую гонку в достижении поставленной цели, требующую проведения фундаментальных и прикладных исследований. В 2005 г. корпорация Intel сообщила о создании лазера на кремнии, обеспечивающего генерацию на длине волны 1,6 мкм при световой накачке. Этот успех можно считать только началом пути в решении поставленной задачи, поскольку с точки зрения разработки схемы световая накачка интереса не представляет. Необходимы излучатели, управляемые электрическим напряжением. И здесь предстоит еще большой объем работы.

Заключение

В современной кремниевой технологии создания схем с характерным размером менее 65 нм разрабатываются подходы, основанные на увеличении быстродействия за счет формирования напряженных слоев, слоев германия и соединений $A^{III}B^V$. Ожидается, что к 2012 г. кремний может быть заметно потеснен углеродными нанотрубками и соединениями $A^{III}B^V$. Что касается области размеров меньше 10 нм, то для нее академическому сообществу предстоит решить проблему создания принципиально новых приборов, основанных не на протекании в структуре тока (как в настоящее время для большинства приборов), а на эффектах межчастичного (межъядерного) взаимодействия: переориентация спинов (или полного магнитного момента), переориентация электрических диполей.

УДК 537.6/8

ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЕ ДОГАДКИ: ОТКРЫТИЕ ФАРАДЕЕМ И МАКСВЕЛЛОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ЕГО ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ

Рассмотрены история качественных воззрений М. Фарадея и количественная теория Дж. К. Максвелла, описывающие представление об электромагнитном поле. Показано, как концепция Фарадея решила многолетний спор между сторонниками далеко- и близкодействия в природе в пользу первых. Высказаны соображения, каким образом Дж. К. Максвелл догадался ввести в обиход понятие о токе смещения.

© 2006 г. В. И. Фистуль
РАЕН

Введение

В этом году отмечают две юбилейные даты: 215 лет со дня рождения Майкла Фарадея (1791—1857) и 175 лет со дня рождения Джеймса Клерка Максвелла (1831—1879). Открытия, сделанные ими,

положили начало огромной области научной и технической деятельности человечества — электротехническому материаловедению и, как следствие, — электротехническим приборам. До них в науке существовал только один физический объект — частицы и лишь один вид взаимо-