



## ГЛАВА 2

# НАНОЭЛЕКТРОНИКА

### Нанотрубка в роли транзистора<sup>1</sup>

Оказывается, для того чтобы сделать транзистор на основе нанотрубок, уже не нужно прилагать дополнительных усилий — делать между ними полимерные переходы и т.п. Как установили ученые из Калифорнийского университета UCSD и университета Клемсона, Y-образная нанотрубка полностью выполняет функции транзистора, обладая при этом более высоким быстродействием (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Схема Y-транзистора

транзистором без какой-либо дальнейшей обработки, — говорит Прабхакар Бандару, профессор из UCSD. — Использование этих наноструктур в современной электронике позволит существенно уменьшить размеры и ускорить производительность компьютерных чипов и других электронных устройств, работающих на полупроводниковых транзисторах».

Быстрое развитие микроэлектроники в конце XX в. обусловлено в первую очередь постепенным уменьшением размеров транзисторов, которые стали базовым блоком почти всех бытовых и промышленных устройств. Однако в конце текущего десятилетия будет достигнут предел миниатюризации транзисторов. По словам специалистов Intel, из-

В статье, которая опубликована в сентябрьском выпуске журнала Nature Materials, а сейчас доступна он-лайн, исследователи описывают Y-нанотрубки, которые, по их мнению, могут заменить современные МОП (металл-оксид-полупроводниковые)-транзисторы и послужить основой новой элементной базы. Теперь сеть разветвленных нанотрубок сможет заменить электронный чип целиком.

«Впервые выращенная нанотрубка становится нано-

<sup>1</sup> Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 11.



готовление транзистора размером менее 100 нм сопряжено с большими трудностями. Как говорит Бандару, благодаря свойствам нанотрубки ее можно использовать в качестве основы для нового класса транзисторов и других полупроводниковых приборов.

Для того чтобы создать нанотрубку в форме буквы Y, ученые разработали новую технологию выращивания. Сначала была выращена обычная «прямая» нанотрубка, затем на ее поверхность нанесли специально обработанные наночастицы титана, которые выступили в роли катализаторов роста еще одной ветви на поверхности уже сформированной нанотрубки.

Когда Y-транзистор был готов, исследователи изучили его электрические свойства. Как показали результаты измерений вольт-амперных характеристик наносистемы, после прикладывания напряжения на «ствол» нанотрубки протекание электронов от одной ветви к другой прекращается. Это характерная особенность транзисторных ключей: при подаче напряжения на затвор ток между истоком и стоком не протекает. И наоборот: как только ученые приложили положительный потенциал к «стволу» нанотранзистора, протекание тока через «ветви» возобновилось. «То, что одна, хоть и разветвленная, нанотрубка выполняет функции транзистора, — уже большое достижение. Фактически мы создали наименьший в мире работоспособный нанотранзистор, — говорит Бандару. — Если нам удастся разработать простую и эффективную технологию синтеза Y-нанотранзисторов, то мы придем к еще одной революции, только уже в нанoeлектронике».

Исследователи планируют провести ряд экспериментов с нанотранзистором и использовать различные виды наночастиц для выращивания наноструктур с другими электрическими свойствами Y-перехода (рис. 2.2).

Если учесть то, что технологии создания разветвленных наноструктур на основе нанотрубок уже разработаны, то создание такого нанотранзистора может помочь в производстве чипов, состоящих из одной сложной сети нанотрубок. Нейросетевые подобиия, сформированные нанотрубками, уже довольно хорошо известны ученым, а их перевод на электронную базу с учетом свойств Y-соединений не вы-

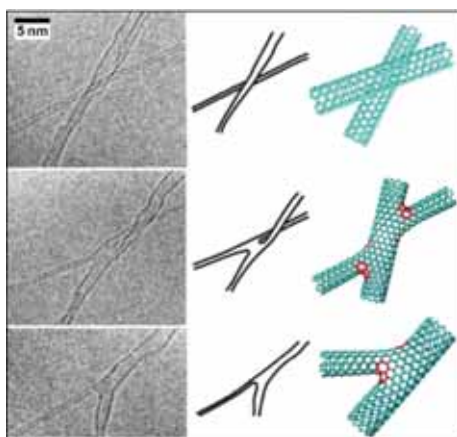


Рис. 2.2. Нейросетевой чип с Y-переходами





Компания Infineon создала самый маленький в мире транзистор

43

зовет трудностей. Так, электроника будущего будет не только компактной, но и сверхбыстрой, поскольку передача электрических сигналов по металлизированным нанотрубкам является до сих пор одним из самых распространенных направлений в микросхемотехнике. Остается разработать эффективный метод производства нейросетей и других разветвленных структур на основе нанотрубок с контролем конфигурации получившихся соединений. Вполне возможно, что тогда одна такая сложная наноструктура сможет полностью заменить, например, чип компьютерного микропроцессора.

### **Компания Infineon создала самый маленький в мире транзистор на нанотрубке<sup>1</sup>**

Компания Infineon Technologies AG (FSE/NYSE:IFX) совершила прорыв в производстве нанотранзисторов на основе нанотрубок. Ей удалось создать работоспособный нанотранзистор с длиной проводящего канала всего 18 нм. Современные нанотранзисторы — и экспериментальные, и работающие — уже в серии полупроводниковых устройств характеризуются вчетверо большими размерами проводящего канала. Исследователи из Мюнхенской лаборатории компании Infineon использовали в новом полупроводниковом устройстве нанотрубку диаметром от 0,7 до 1,1 нм, которая была выращена специалистами компании.

Электрические характеристики углеродных нанотрубок сделали их идеальными кандидатами для использования в микро- и нанoeлектронике. Благодаря «баллистическому электронному транспорту» нанотрубки проводят электроэнергию с наименьшим сопротивлением. Поэтому они характеризуются электропроводностью в 1000 раз большей, чем у меди.

Более того, нанотрубки могут выступать как в роли проводников, так и в роли полупроводников. Компания Infineon первой задумалась над промышленным применением полупроводниковых устройств на основе нанотрубок. Исследовательский состав компании разработал новые методы производства нанотрубок для их использования в нанотранзисторах.

Также исследователи смогли выращивать нанотрубки на определенных поверхностях. Новый нанотранзистор (рис. 2.3) может проводить токи до 15 мА при подаче на него напряжения всего 0,4 В (обычные нанотранзисторы работают на напряжении 0,7 В). При производстве микрoeлектронных компонентов на основе нового чипа плотность размещения транзисторов будет в десять раз больше, чем в современных чипах. Также исследователи из Infineon предполагают, что из-за низкого напряжения питания чипы на новых транзисторах станут более экономичными, чем современные.

<sup>1</sup> Nanotechnology-Now (23 октября 2004 г.).

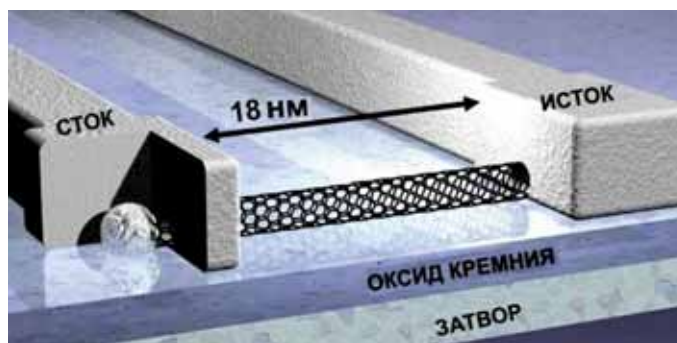


Рис. 2.3. Полевой нанотранзистор на основе нанотрубки от Infineon

Уменьшение напряжения питания до 35 В не предполагалось производителями чипов до 2018 г., а новый транзистор работает на 0,4 В уже сейчас. Как мы писали ранее, новая паровая технология производства нанотрубок обещает сделать их дешевыми. Так что вполне возможно, что через несколько лет в микроэлектронике будут использоваться нанотранзисторы на основе нанотрубок.

### IBM утроит производительность транзисторов<sup>1</sup>

Компания IBM представила новую технологию, которая позволяет втрое улучшить производительность транзисторов. Это даст возможность компании производить в следующем десятилетии более компактные и быстродействующие чипы, сказали исследователи из IBM. При этом новый метод совместим с традиционной CMOS-технологией.

По словам исследователей, ускорить работу транзистора позволил слой напряженного германия (strained *Ge*). Так же как и в случае напряженного кремния (strained silicon), «изюминка» технологии состоит в том, что в кристалле полупроводника создается механическое напряжение, приводящее к повышению подвижности носителей заряда и, как следствие, улучшению характеристик транзисторов, в частности увеличению величин электрических токов, протекающих через транзистор.

По данным IBM, транзисторы, выполненные из напряженного германия, обладают втрое лучшими параметрами по сравнению с транзисторами из обычного кремния. Как полагает компания, применение технологии напряженного кремния будет необходимо для изготовления интегральных микросхем с соблюдением 32-нанометрового техпроцесса. Сообщается, что ключевым моментом техно-

<sup>1</sup> Infoworld.com: IBM triples transistor performance with germanium (7 декабря 2004 г.).



## Транзистор с плавником от Infineon уменьшил flash-память

45

логии является создание тонкого слоя германия на затворе транзистора.

Германиевые или гибридные кремний-германиевые технологические процессы – а, судя по всему, именно о таком процессе и идет речь, – как правило, являются более трудоемкими и дорогими, чем кремниевые, да и используются они куда реже.

Новые чипы на основе напряженного германия по 32-нанометровому техпроцессу IBM планирует выпускать только в 2013 г. Напомним, что чипы по 65-нанометровому техпроцессу появились на рынке уже в 2005 г.

Компания IBM официально объявит об использовании новой технологии на Международной конференции по электронным устройствам (2004 International Electron Devices Meeting), которая состоялась в Сан-Франциско. IBM представила первый наименьший в мире чип SRAM (статическая RAM). Компании-производители чипов почти всегда тестируют новые технологии созданием SRAM-ячеек. Исследователи использовали новые методы в производстве SRAM (ячейка состоит всего из шести транзисторов). Новые ячейки SRAM в два раза меньше изготовленных ранее прототипов и в 10 раз меньше, чем используемые в серийном производстве.

## Транзистор с плавником от Infineon уменьшил flash-память<sup>1</sup>

Германские ученые из компании Infineon Technologies создали наименьший в мире чип энергонезависимой памяти (nonvolatile flash memory), что удалось благодаря сверхмалым FET-транзисторам. Новый чип размерами всего 20 нм может длительно хранить один бит без подачи на устройство энергии. Самая «продвинутая» современная flash-память, выполняющая аналогичные функции (хранение 1 бита памяти), имеет размеры около 90 нм. За последнее время flash-память стала популярна благодаря ее простому использованию в цифровых фотоаппаратах, MP3-плеерах, USB-стиках и видеокамерах.

Все попытки уменьшить flash-чипы, использующие технологию 90 нм, не увенчались успехом, вследствие физических ограничений, накладываемых процессом их производства. Ученым из Infineon удалось создать новый 20-нанометровый чип только благодаря ранее изобретенному полевому транзистору FinFET (рис. 2.4), который имеет трехмерную структуру расположения слоев полупроводников. Благодаря ей удалось уменьшить размеры транзистора. Совершенные транзисторы – «плоские», и из-за такой геометрии трудно добиться большей миниатюризации.

<sup>1</sup> Info World: Infineon designs smallest nonvolatile flash memory chip.

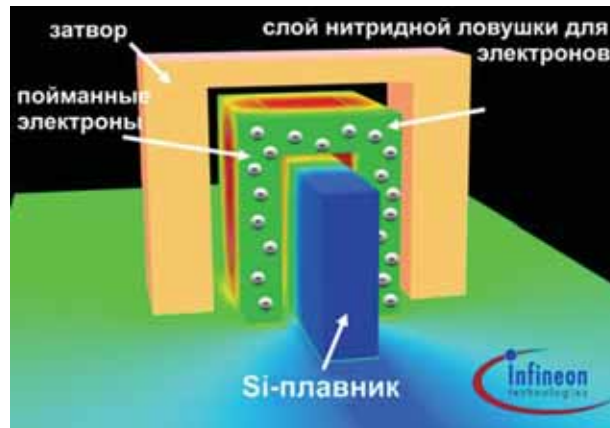


Рис. 2.4. Строение FinFET транзистора

Расскажем подробнее о новом полевом транзисторе FinFET. Один из главных компонентов транзистора — кремниевый «плавник» (fin) толщиной всего 8 нм, который проходит через нитридный слой, играющий роль «ловушки» для носителей информации — электронов. Затвор транзистора размерами 20 нм управляет «плавником», который, в свою очередь, обеспечивает переключение «ловушечного слоя». Транзистор сконструирован таким образом, что «ловушечный слой» электрически изолирован от «плавника» и затвора. В логическом состоянии, соответствующем «1», в «ловушку» попадает около 100 электронов. В современных чипах ячейка памяти в состоянии «1» содержит их около 1000.

Как и современные элементарные ячейки flash-памяти, новая может хранить одновременно 2 бита, это предусмотрено структурой и электрическими характеристиками транзистора.

Как сообщили представители компании, новый flash-чип, который может хранить до 32 Гбит информации, будет в 8 раз меньше продающихся сегодня чипов. О создании новой памяти компания сообщила на Международной конференции по электронным устройствам в г. Сан-Франциско.

### Сверхконденсаторы из углеродных нанотрубок<sup>1</sup>

Сверхконденсаторы очень большой емкости можно сделать из углеродных нанотрубок, используя технологию, предложенную исследователями из UC Davis. Сверхконденсаторы — это устройства для хранения

<sup>1</sup> Nanotubes enable dense supercapacitors (<http://www.automotivedesignline.com/showArticle.jhtml?printableArticle=true&articleId=60405658>).



электричества, способные выдавать большое количество энергии за короткое время. Транспортные средства, работающие на электричестве и топливных ячейках, требуют для старта более мощный импульс электричества, чем могут обеспечить обычные батареи. Сверхконденсаторы также пригодятся в электронике и других областях, где необходим мощный и короткий импульс энергии. Новые устройства могут вырабатывать 30 кВт/кг по сравнению с 4 кВт/кг, характерные для самых «продвинутых» современных конденсаторов.

Профессор Ning Pan и его команда создали суспензию из нанотрубок — крошечных пустотелых углеродных цилиндров диаметром в несколько атомов. Они разработали метод нанесения нанотрубок на никелевую подложку так, чтобы нанотрубки располагались близко друг к другу. Традиционные конденсаторы (или «конденсаторы Фарадея») накапливают электрический заряд между двумя проводящими пластинами, разделенными слоем диэлектрика. При этом чем больше площадь их поверхности, тем больший заряд накапливает конденсатор. «Благодаря своему малому размеру нанотрубки обладают огромной площадью поверхности, на которой можно накапливать энергию», — говорит Pan.

Результаты работ опубликованы в февральском выпуске журнала Nanotechnology.

## Фотонные транзисторы в кремниевом исполнении<sup>1</sup>

Большинство электронных устройств в скором времени могут стать фотонными, т.е. вместо электронов, переносящих информацию, будут «курсировать» лучи света — фотоны.

Многие эксперты в области микроэлектроники предвидят именно такой сценарий развития микроэлектроники, используемой в вычислительной технике. Эта область науки развивается уже с 1970 г. Фотоника (так называется эта новая область устройств, где в качестве основного сигнала используются отдельные фотоны) может применяться в таких областях, как телекоммуникации, маршрутизация Интернета, оптоволоконные сети, и, конечно, в создании «световых компьютеров».

Почему же так выгодно использовать фотонику вместо обычной электроники? Во-первых, фотонные устройства будут потреблять меньше энергии. Во-вторых, с помощью фотонных чипов можно будет оперировать большими объемами информации и, следовательно, скорость вычислений возрастет.

Грубо говоря, в фотонном чипе лучи света заменят ток электронов по проводникам в аналогичном электронном чипе. Вот почему фотон-

<sup>1</sup> Cornell News Service: Making the big step from electronics to photonics by modulating a beam of light with electricity (<http://www.news.cornell.edu/stories/May05/LipsonElectroOptical.ws.html>).



ные чипы экономичнее электронных: фотоника гораздо меньше отдает теплоты в окружающую среду и, следовательно, меньше потребляет энергии для работы.

На сегодняшний день имеется ряд прототипов нанофотонных устройств. Однако есть проблема: фотонные устройства надо органично «вписать» в море современной электроники. И для этого необходимо сконструировать устройство, которое обеспечивало бы взаимодействие между фотонными и электронными чипами. Такое устройство можно назвать «фотонным транзистором», или «фотонным ключом» (рис. 2.5). Его функция – пропускать световые волны при наличии соответствующего сигнала и не пропускать, если сигнала разрешения нет.

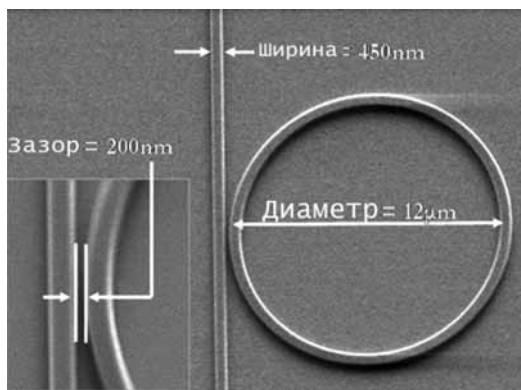


Рис. 2.5. Микрофотография фотонного чипа

В Корнеллском университете (США) исследователям удалось приблизиться к решению этой проблемы. Они смогли создать устройство, которое переводит электрический сигнал в модулируемый световой луч в наноразмерном диапазоне. При этом размеры фотонного устройства позволяют использовать его в маршрутизаторах, оптоволоконных сетях и микропроцессорах.

Такие устройства удавалось делать и ранее, но их размеры составляли несколько миллиметров. Естественно, что связывать чип миллиметровых размеров с современными микросхемами по 90-нанометровому техпроцессу было бы неэффективно. Ученые из Корнелла смогли сделать такой же чип размерами несколько микрометров. Такое устройство уже можно интегрировать в современные микросхемы.

Удалось это сделать благодаря использованию арсенида галлия. Этот полупроводник легко можно интегрировать в полупроводниковые устройства, и он в основном применяется в современной микроэлектронике.

О работе ученые сообщили в майском выпуске журнала Nature 2005 г. Руководил исследованиями ученый из Корнеллского университета Майкл Липсон.

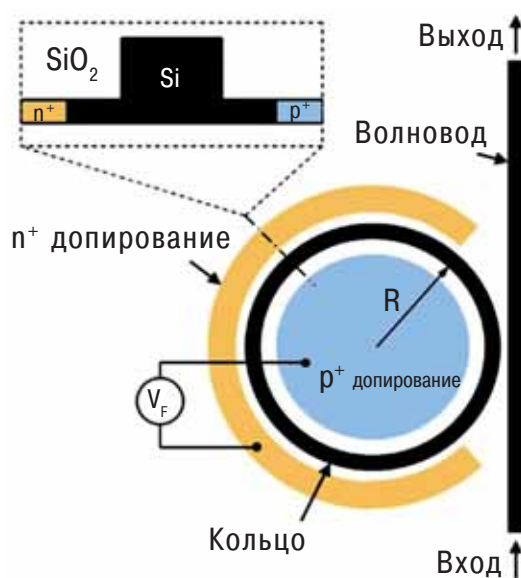


Рис. 2.6. Принцип действия фотонного ключа

В основу нанофотонного модулятора лег кольцевой резонатор, который отстоит от прямого светового волновода на 200 нм (рис. 2.6). Свет, проходящий через прямой отрезок волновода, множество раз обигает кольцевой резонатор. Явление это широко известно и используется в фотонных устройствах. Причем от диаметра кольца напрямую зависит длина волны светового пучка на выходе из резонатора. Ученые использовали диаметры 10 и 12 мкм и получили свет с длиной волны 1555 и 1576 нм соответственно. Свет с такой длиной волны лежит в инфракрасном диапазоне длин волн.

Теперь расскажем о механизме модуляции света электроникой. Кольцо-модулятор расположено на поверхности из отрицательно допированного кремния, а внутри кольца — область с положительным допированием (рис. 2.6). Поэтому волновод представляет собой зону раздела между  $p$ - и  $n$ -областями  $p$ - $n$ -диода, образованного структурой волновода и полупроводников.

Как только на микросистему подают напряжение, электроны и дырки поступают в область волновода, изменяя его оптический коэффициент преломления. Соответственно у волновода изменяется резонансная частота света, которую он может пропускать. Таким образом, напряжение «запирает» свет, проходящий через прямой отрезок волновода.

Ранее ученые использовали похожий принцип диода в фотонике для того, чтобы модулировать свет в прямых участках волновода. И это удавалось только тогда, когда свет проходил сравнительно большое расстояние по волноводу. Соответственно, для работы устройства нужен вол-



новод большей длины, и тогда чип будет уже макроскопических размеров. А ученые из Корнелла заставили бежать свет по кругу в резонансном кольце, тем самым удлинив его путь.

В тестах ученые подавали на устройство 0,3 В и этого хватало, чтобы прекратить распространение света по волноводу. Затем исследователи протестировали устройство на частоту включений. Результаты оказались довольно оптимистичными: с помощью кольца-резонатора ученые пропустили через фотонный транзистор 1,5 Гбит в секунду. Модулирование света позволило пропустить серию 0 и 1 за столь короткое время. А процесс передачи одного бита занимал несколько десятых пикосекунды.

### HP провозглашает конец кремниевой эры<sup>1</sup>

Компания HP впервые официально заявила о том, что у нее есть стратегия развития нанoeлектронной базы, которая составит основу будущей электронно-вычислительной промышленности. Презентацию новой технологии производства компания провела в ряде статей журнала *Applied Physics*.

«Мы уверены, что благодаря новому подходу в области микроэлектроники и нанотехнологиям технологии производства компьютерных чипов переместятся ниже по размерной шкале до отдельных молекул. Это позволит отказаться от традиционной кремниевой микроэлектроники и начать освоение молекулярной нанoeлектроники, — сказал Стэн Уильямс, глава отдела HP в области квантовых исследований. — Переход к молекулярной электронике состоится благодаря развитию трех направлений: результатам фундаментальных исследований в области квантовой физики в наноразмерном диапазоне, построению архитектуры чипов нового типа, позволяющей более эффективно использовать возможности нанoeлектроники, и, конечно, методам дешевого массового производства нанoeлектронных компонентов».

Заявлению HP журнал *Applied Physics* посвятил специальный выпуск, в котором были детально освещены все три направления.

HP организовала международный симпозиум в области нанотехнологий, который состоялся 25 марта 2005 г. в HP Labs. Обсуждали на нем стратегии перехода от микро- к нанoeлектронике только приглашенные лица. На симпозиуме присутствовали 16 наиболее известных ученых в области микроэлектроники, а также представители крупнейших электронных компаний и университетов. На симпозиуме также обсуждалось будущее закона Мура, сформулированного 40 лет назад. Гордон Мур, глава компании Intel, сформулировал эмпирический закон, согласно которому производительность выпускаемых процессоров удваивается

<sup>1</sup> Beyond Silicon: HP Outlines Comprehensive Strategy for Molecular-scale Electronics (<http://www.hp.com/hpinfo/newsroom/press/2005/050314a.html>).



каждые два года. Технология производства современных микроэлектронных чипов приближается к тому пределу, после которого соблюдение закона станет невозможным. Однако благодаря наноэлектронике и молекулярным системам обработки информации этот закон может получить «второе дыхание».

«Компьютеры будущего будут разительно отличаться от современных, — говорит Уильямс. — Представьте себе, что вы можете сделать вычислительное устройство, помещающееся на торце человеческого волоса. Благодаря таким сверхмалым размерам конечный продукт (мобильный телефон, персональный компьютер) сможет выполнять гораздо больше функций, чем сейчас. Поэтому компьютеры станут такими же доступными и повсеместными, как воздух, вода или электричество, используемые в повседневной жизни. Применение нанокомпьютеров ограничено только нашим воображением».

Такие заявления и прогнозы компании HP связаны с новой архитектурой построения компьютеров. Она основана на новых молекулярных ключах (рис. 2.7), представляющих собой пересекающиеся линии, между которыми при подаче на них напряжения возникают проводящие мостики. Преимущество нового ключа состоит в том, что благодаря конструкции устройства емкость памяти на его основе будет выше той, которая существует сейчас. Если же применять каждый ключ в качестве элемента памяти, то емкость одного слоя составит 2,5 Гбит/см<sup>2</sup>, в то время как самые «сверхплотные» чипы памяти характеризуются емкостью в 1 Гбит/см<sup>2</sup> (рис. 2.8).

Такая архитектура позволяет использовать каждое место пересечения в качестве ячейки памяти или транзистора. Также конструкция логики позволяет максимально использовать объем чипа, что приведет к созданию многослойных наноэлектронных устройств.

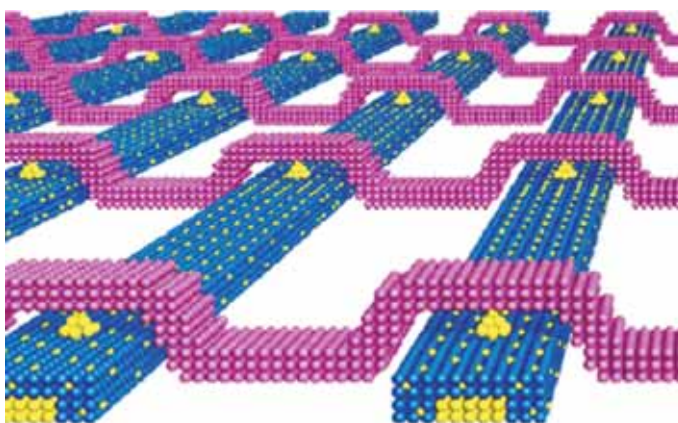


Рис. 2.7. Матрица наноэлектронных ключей

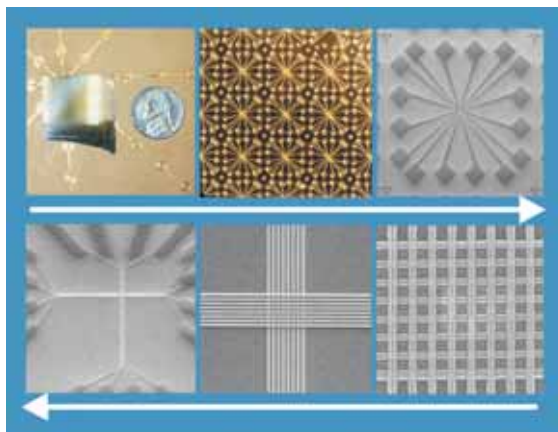


Рис. 2.8. Ранее изготовленный нанoeлектронный чип памяти на основе новой архитектуры (стрелками указано увеличение масштаба)

Как утверждают специалисты компании, «узловая» архитектура, сформированная пересекающимися нанопроводниками (crossbar architecture), позволит упростить массовое производство чипов. Как ни странно, новые чипы будут дешевле обычных кремниевых благодаря большим объемам производства.

Уильямс также заявил, что компания увеличит количество исследований, проводимых в наноразмерном диапазоне, чтобы лучше разобраться с физикой наномира.

«В наноразмерном диапазоне квантовая механика играет большую роль, поэтому ею нельзя пренебрегать. Это связано с волновой природой электрона. Как раз в “квантовом” мире электрон ведет себя как волна, а не как частица. Это, конечно, приносит много проблем при конструировании нанoeлектронных устройств. Но с другой стороны это же позволяет создать более быстродействующие компьютеры. Сейчас мы работаем над тем, как можно использовать эти квантовые эффекты для повышения быстродействия чипов», — говорит Уильямс.

И наконец, исследовательские коллективы HP работают над переводом лабораторных прототипов в массовое производство. Одна из основных задач команды состоит в том, чтобы найти экономически эффективные методы производства наночипов. «Это давняя традиция компании — поддержка производства новыми исследованиями, идеями, прототипами, — говорит Уильямс. — Мы делаем все для того, чтобы в будущем нанокomпьютеры стали основной линией продуктов HP».

Исследователей в первую очередь интересует возможность нанолитографии для производства новых чипов. Но ведутся исследования и в области химической самосборки — это позволит достичь больших объемов производства.



Интересно то, что подход компании многосторонний: квантовые ключи предполагают использовать в качестве сенсоров для анализа молекул ДНК.

«Конечно, по развитию нанoeлектроники в НР работы много, и мы не справимся с исследованиями и их реализацией без коллег и партнеров из других компаний, — говорит Уильямс. — Вот почему мы и организуем симпозиум. На нем мы попытаемся решить наиболее важные вопросы о сотрудничестве с другими исследовательскими коллективами».

### Квантовый выключатель — основа будущей нанологии<sup>1</sup>

Исследователям из японского Национального института материаловедения удалось перенести старую технологию механоэлектрических выключателей на квантовый уровень. Они создали миниатюрный механический выключатель, подобный тем, которые по сей день используются во многих бытовых приборах.

Принцип работы выключателя прост — при подаче напряжения на устройство между двумя нанопроводниками возникает или распадается мостик из серебра, который выполняет роль проводника.

Длина мостика, по которому протекает ток, — всего 1 нм. На отрезке длиной 1 нм можно расположить 10 атомов водорода, поэтому сообщение о создании нового квантового устройства претендует на сенсацию.

Исследователи говорят, что нанoeлектроника на основе новых квантовых переключателей может вытеснить современную уже через 10 лет. Именно за такой срок, как они полагают, удастся коммерциализовать открытие Тсуоши Хасегава и его команды. Хасегава — директор Национального института материаловедения Японии.

В отличие от обычных механоэлектрических переключателей, у нанoаналога нет движущихся механических частей. «Переключатель из серебра возникает между шинами просто от подачи на них напряжения», — говорит Хасегава.

Мостик, состоящий из атомов серебра, формируется, когда между шинами возникает небольшая положительная разность потенциалов. А когда это напряжение меняет знак, мостик разрушается. Квантовое устройство работает при комнатной температуре и обычном окружении (давление, сухость воздуха и пр.).

Прототип, изготовленный учеными, переключается с частотой около 1 МГц (или миллион раз в секунду) при разнице потенциалов между шинами  $\pm 600$  мВ. Частота переключений устройства связана с толщиной шин. Как говорит Хасегава, если их еще уменьшить, то можно достичь частоты в 1 ГГц. Этот частотный предел использует современная электроника (рис. 2.9).

<sup>1</sup> TRN: Nano bridge builds logic.

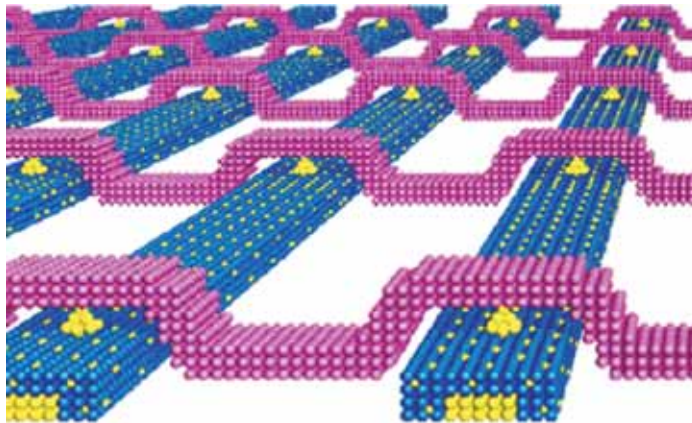


Рис. 2.9. Матрица квантовых наноключей

Расскажем, как происходит формирование серебряного мостика. Весь секрет заключается в составе нанопроводников — шин. Один проводник выполнен из чистого серебра, покрытого тонким слоем сульфида серебра, второй — из платины, тоже покрытой чистым серебром. При возникновении положительной разности потенциалов между шинами атомы серебра выделяются из сульфида в мостик длиной 1 нм, и соответственно при изменении знака напряжения мостик разрушается и атомы возвращаются в сульфид.

Преимущество нового ключа состоит в том, что благодаря конструкции устройства емкость памяти на его основе будет выше той, которая существует сейчас. Если же использовать каждый ключ в качестве элемента памяти, то емкость одного слоя составит 2,5 Гбит/см<sup>2</sup>, в то время как самые сверхплотные чипы памяти характеризуются емкостью в 1 Гбит/см<sup>2</sup>.

То, что новое устройство работает по законам квантовой физики, позволяет создавать на его основе многобитную память. Как известно, в квантовой физике различные энергетические состояния квантуются, принимая определенные дискретные состояния. Поэтому один (!) ключ может представлять 16 состояний или 4 бита — так утверждает Хасегава.

Исследователи смогли сконструировать логические ячейки И, ИЛИ и ИЛИ-НЕ на основе нового ключа. Все логические устройства показали хорошие рабочие характеристики. Теперь ученые разрабатывают методы серийного производства матрицы квантовых ключей. Как говорит Хасегава: «Если нам удастся разработать многослойные чипы на основе этих переключателей, то произойдет еще одна революция в микроэлектронике».

Работа Хасегавы впервые появилась в январском выпуске журнала Nature 2005 г.



## Способ массового производства электронных схем на основе нанотрубок<sup>1</sup>

Физики из Университета Пенсильвании (США) разработали принципиально новый метод производства электронных микросхем на основе нанотрубок. Нанотрубки давно используются в прототипах электронных устройств, нанотранзисторов и микрочипов, однако до сих пор технология расположения отдельных нанотрубок на интегральных схемах была несовершенна. Многие исследователи выращивали нанотрубки на месте контактов, некоторые пользовались дорогостоящими наноманипуляторами. Теперь достаточно подготовленную специальным образом заготовку интегральной микросхемы опустить в раствор с нанотрубками, и они образуют наперед заданные наноструктуры на поверхности чипа.

«Благодаря своим удивительным электрическим свойствам нанотрубки давно служат объектом пристального интереса со стороны производителей микроэлектронных компонентов. Электроника на их основе может быть и прозрачной, и гибкой, и высокоскоростной. Плоские панели на основе нанотрубок, например, могут быть гораздо более дешевыми, чем обычные LCD-мониторы. Вот только существовала одна проблема — до сих пор не было технологии, позволяющей размещать нанотрубки на чипе. Но мы решили эту проблему», — говорит Алан Джонсон, профессор из Пенсильванского университета.

Процесс выращивания нанотрубок — довольно сложная операция, ее нелегко выполнить на готовой микросхеме. Гораздо легче было бы сначала их синтезировать, а затем разместить на чипе.

«Сегодня мы добились того, что чип погружается в раствор с нанотрубками, формируя готовую микросхему. Этот процесс похож на приготовление пломбира: мороженое окунают в шоколад и потом охлаждают. А нам удалось еще заставить нанотрубки присоединяться только к определенным местам на чипе, которые промаркированы заранее», — продолжает объяснять Джонсон.

«К счастью, другим ученым удалось разработать методику сепарации синтезированных нанотрубок на так называемые “полупроводниковые” и “металлические”. Применительно к технологии нанесения нанотрубок на чип это поможет в несколько раз ускорить производство микросхем на нанотрубках», — говорит Арджун Йодх, профессор Пенсильванского университета из отделения физики и астрономии (рис. 2.10).

Ученые, открывшие процесс отделения одного типа нанотрубок от другого, говорят, что сделали своеобразный «очиститель», который сможет выдавать большое число одинаковых нанотрубок. Это довольно ценное открытие, так как в массовом продукте, получающемся после

<sup>1</sup> Nanotechnology-Now: Perm Researchers Take a Big Step Forward in Making Smaller Circuits.

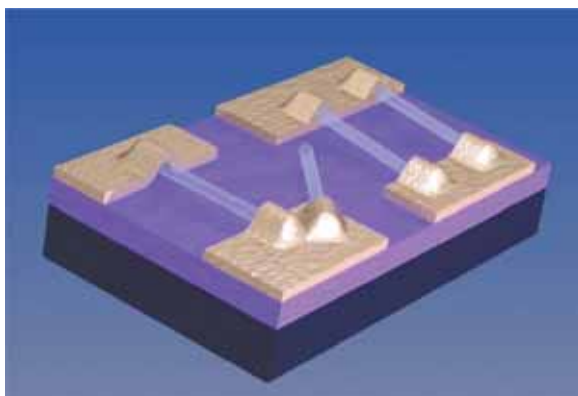


Рис. 2.10. Нанотрубки, нанесенные на чип по новой технологии

синтеза нанотрубок, содержится большое количество примесей. А Алан Джонсон и его коллеги узнали, что если в раствор с «очищенными» нанотрубками добавить кремниевый чип со специальными клеевыми маркерами, то нанотрубки сформируют такую электрическую цепь, которую заранее нарисовали на чипе ученые.

«Пока известен только один способ ускорения процессоров: это добавление все большего и большего числа транзисторов. Еще в начале 2000 г. появились транзисторы на основе нанотрубок. Вот только мы не могли тогда скомпоновать из них процессоры. Теперь появился вполне реальный шанс сделать компьютер на основе нанотрубок-транзисторов», – говорит в заключение Джонсон.

Работа исследователей финансировалась Национальным научным обществом США и агентством NASA.

### Штампуя наносистемы<sup>1</sup>

В арсенале нанотехнологов появилась новая технология производства микро- и наноструктур. Ее предварительное название – печать микро-смещением (microdisplacement printing). Она позволяет с высокой точностью наносить на микро- и нанокомпоненты отдельные молекулы. В первую очередь печать микро-смещением будет применяться в нанoeлектронике, производстве чипов и наносенсоров. Новая технология удобна еще и тем, что в процессе производства можно создавать библиотеки молекулярных шаблонов, которые значительно упростят конструирование наносистем.

Новая технология основана на методе микроконтактного печатания (рис. 2.11). Изготовление наноструктур этим способом не требует нали-

<sup>1</sup> Nanotech-Now: New Microprinting Technique Improves Nanoscale Fabrication.

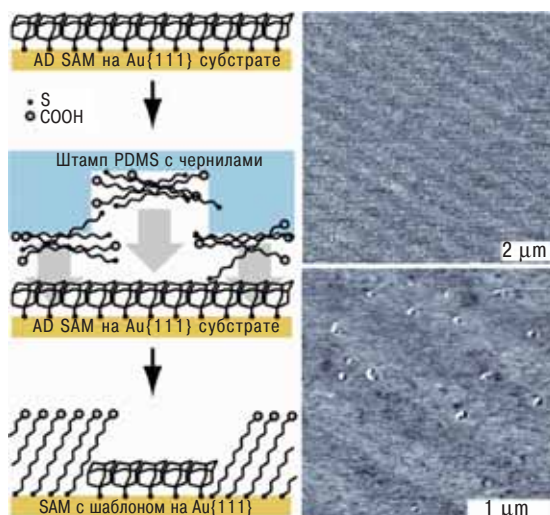


Рис. 2.11. Демонстрация печати микросмещением

чия сверхчистой комнаты или других специфических дорогостоящих условий. Оба метода «штампуют» молекулярные шаблоны раствором молекул на поверхности. Процесс можно сравнить с тем, как чиновник ставит печать на бумагу.

«Печать микросмещением позволит нам использовать различные типы молекул для производства наносистем», — говорит Пол Вайс, один из исследователей.

Недостаток микроконтактной печати — уменьшение точности печатания вблизи углов штампа — отсутствует в новом методе производства. Эта проблема решена путем использования самособирающихся мономерных пленок, содержащих молекулы адамантана.

«Мы обрабатываем субстрат раствором, содержащим эти молекулы, и вскоре они собираются в цельный мономолекулярный слой», — поясняет Вайс.

Кроме того, что печать микросмещением обеспечивает высокую точность, «печати» можно заряжать различными типами «чернил». Так можно составлять большие библиотеки готовых образцов, а затем быстро наносить их на поверхность.

Провести исследования определения точности молекулярных оттисков Вайсу и его команде помогла коллекция высокоточных сканирующих электронных микроскопов, находящаяся в их лаборатории.

«Сейчас мы заняты разработкой стратегий использования новой технологии, которые позволят применить ее не только в химии нанопленок и супрамолекулярных структур, но и в нанoeлектронике, — объясняет Вайс. — Мы хотим преодолеть барьер точности в 1–100 нм и при этом сделать производство наносистем более быстрым и дешевым».



## Компания TSMC объявила о промышленном выпуске чипов по 65-нанометровому техпроцессу к концу 2005 г.<sup>1</sup>

Компания Taiwan Semiconductor Manufacturing Co. Ltd. запустит массовое производство микроэлектронных компонентов по 65-нанометровому техпроцессу в конце 2005 г. Как сказал президент компании Моррис Чанг, развитие технологии массового производства по 65-нанометровому техпроцессу будет стоить компании около 1 млрд долл. Это вдвое больше, чем развитие 130-нанометрового техпроцесса компанией TSMC, и больше на треть, чем развитие производства по 90-нанометровому техпроцессу, пояснил Чанг.

В этом году компания TSMC уже потратила около 400 млн долл. на развитие нового 65-нанометрового техпроцесса. В начале 2004 г. компания создала тестовый SRAM-чип с использованием 65-нанометрового техпроцесса. Как объявила компания, чипы, произведенные по новому техпроцессу, характеризуются низким энергопотреблением и высокой скоростью работы. Руководство компании также заявило, что промышленное производство по 65-нанометровой технологии с высокой скоростью выпуска готового продукта появится в первой половине 2006 г.

Компания TSMC уже около года разрабатывает технологии промышленного производства по 65-нанометровой технологии. Этому периоду предшествовали два года фундаментальных научно-прикладных исследований.

Чанг отметил, что компания сейчас ведет поиск партнеров для дальнейшего промышленного развития 65-нанометровой технологии. «Когда компания средней руки тратит десятки миллионов долларов на развитие новой технологии, то это показатель выживаемости компании на международном рынке», — добавил Чанг.

## HP избавит мир от транзисторов<sup>2</sup>

В лаборатории квантовых исследований (Quantum Science Research, QSR) компании Hewlett-Packard (HP) разработана новая технология производства нанoeлектронных устройств. Они, по утверждению авторов, в недалеком будущем могут прийти на смену современным кремниевым чипам.

Новые наноустройства, названные их разработчиком, ведущим сотрудником QSR Филом Кьюкесом, crossbar latches («поперечные триггеры» или «задвигки-перемычки»), уже сегодня могут использоваться для вычислительных операций в микропроцессорах, т.е. выполнять функции традиционных кремниевых транзисторов. Важнейшее же их отли-

<sup>1</sup> Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 2.

<sup>2</sup> Журнал «Эксперт».



чие от последних — размер, который у узлов-спаек в «перемычках» составляет всего 2–3 нм, тогда как у лучших кремниевых аналогов он не меньше 60 нм.

«Поперечные триггеры» представляют собой решетку из микроскопических платиновых проволочек, соединенных друг с другом в местах пересечения с помощью молекулярного слоя обычных углеводородных кислот. Подобно стандартному транзистору, новая наноструктура способна двояким образом реагировать на электрический сигнал, проходящий через узловые точки.

Вот что сказал один из ведущих британских экспертов в сфере нанотехнологий профессор Ноттингемского университета Филипп Мориа: «Предложенная HP схема — самая перспективная из имеющихся к настоящему времени разработок в молекулярной электронике. Если американские технологи смогут найти эффективные методы ее комбинирования с диодами или резисторами, итоговый продукт может стать базовой составляющей универсальных компьютеров будущего».

Две другие важнейшие задачи, которые еще предстоит решить исследователям из QSR, — резкое увеличение среднего срока службы новых устройств (пока «завдвижек-перемычек» хватает только на несколько сотен компьютерных циклов) и увеличение их тактовой частоты (по скорости включения-выключения платиново-кислотные триггеры проигрывают силиконовым собратьям в несколько тысяч раз).

По словам директора QSR Стэна Уильямса, компания планирует коммерциализовать новую технологию к 2012 г. Впрочем, независимо от того, удастся или нет американским изобретателям справиться с этими проблемами в заявленные сроки, скорое пришествие принципиально новых субмикрометровых компьютеров неизбежно. Физические пределы миниатюризации кремниевых чипов практически достигнуты — по оценкам специалистов, пресловутый «силиконовый дедлайн» наступит в 2020–2021 гг.

Активный поиск альтернатив кремниевым технологиям сегодня идет во многих исследовательских лабораториях. По всей видимости, уже в первой половине следующего десятилетия должны появиться так называемые гибридные чипы, сочетающие в своей структуре как традиционные кремниевые элементы, так и новые материалы (вполне возможно, что ими станут как раз платиново-кислотные триггеры HP). А уже к началу 2020-х гг. может наступить несиликоновая эра.