



ГЛАВА 3

НАНОДАТЧИКИ И НАНОУСТРОЙСТВА

Проект наномеханического вентиля¹

Для того чтобы создать работоспособные наносистемы (редукторы, подшипники и др.), необходимо иметь математическую модель, которая учитывает взаимодействия отдельных атомов. Но так как эти устройства обычно состоят из нескольких тысяч атомов, то математическое моделирование такой сложной системы представляет определенные трудности.

Ученые из Калифорнийского института технологии нашли компромисс: они соединили классические инженерные приемы с молекулярным моделированием для того, чтобы спроектировать наномеханический вентиль для жидкостей. Это устройство может с успехом использоваться в доставке лекарств, биологических и химических тестах, в качестве инжектора для микро- и нанодвигателей и даже в струйных принтерах.

Основа вентиля — кремниевая однослойная нанотрубка. Она играет роль «шланга», по которому протекает жидкость. На нанотрубку опирается консоль, которая может давить на нанотрубку. Как только необходимо прекратить протекание жидкости через нанотрубку, консоль деформируется, пережимая нанотрубку настолько, что жидкость не течет.

Консоль покрыта сверху органическим слоем акриловой кислоты. Все устройство будет находиться в жидкости с изменяющимся pH . Как только pH окружающей среды повысится, суммарный заряд консоли будет негативным (вследствие отбора протонов органического слоя). Этот избыточный отрицательный заряд может вызвать деформацию консоли. Как только pH вернется в норму, органический слой получит дополнительные протоны и консоль выпрямится (рис. 3.1). Для нанесения акрилового слоя на кремниевую консоль ученые предлагают использовать специально модифицированную кремниевую поверхность — $Si(100)$.

В этом проекте исследователи использовали классические инженерные методики для определения конструкции устройства и молекулярное моделирование для того, чтобы узнать, как нанотрубка поведет себя

¹ Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 1.

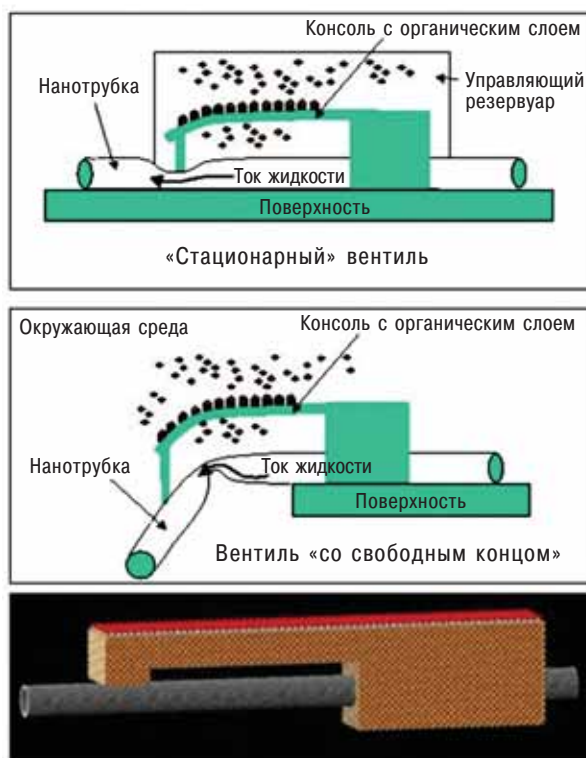


Рис. 3.1. Принцип действия наномеханического вентиля

под действием нагрузки со стороны консоли. Размер управляемого вентиля будет от 34,5 до 70 нм в длину, а все устройство целиком будет состоять из 75 000 атомов.

Для производства прототипа устройства нужно решить еще ряд технологических проблем: нанесение органического слоя на кремниевую консоль; соединение консоли с нанотрубкой, а также производство и соединение с вентилем резервуара жидкости.

Одно из применений нового устройства — наносборка. Точные порции «строительного материала» могут доставляться непосредственно к наноманипуляторам и молекулярным конвейерам.

Струйные принтеры с высоким разрешением печати смогут появиться на рынке уже через три года после производства прототипа вентиля. А вот использования его в доставке лекарств можно ожидать только через 10 лет.

Однако прототип устройства будет создан не ранее чем на следующий год — так заявляют ученые из Калифорнийского института технологии.

Наноэлектромеханический одноэлектронный транзистор с «механической рукой»¹

Профессором Робертом Блайком из Висконсина (США) и его коллегой Домиником Шебли из Мюнхенского университета (Германия) создан принципиально новый электромеханический одноэлектронный транзистор с «механической рукой», которая переносит отдельные электроны от истока к стоку.

Ранее (в 2001 г.) Блайк уже представлял рабочий электромеханический осциллятор, который вибрировал в диапазоне радиочастот и мог переносить отдельные электроны от одного электрода к другому при активации «механической руки» устройства (т.е. работать как транзистор). Установка Блайка изображена на рис. 3.2.

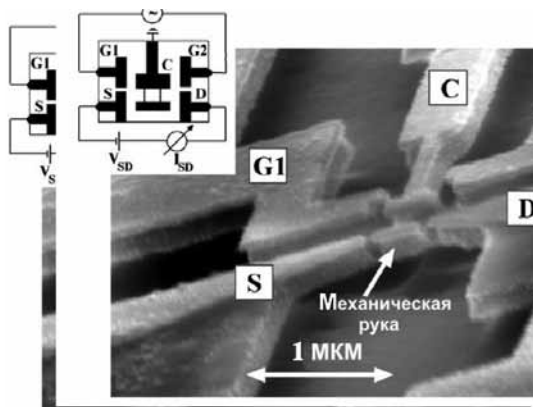


Рис. 3.2. Наномеханический осциллятор Блайка

В центре устройства – вибрирующий маятник, который был назван Блайком «электронным челноком», а журналистами – «механической рукой». Если между точками G1 и G2 приложить переменное напряжение, то маятник будет колебаться с частотой, пропорциональной частоте переменного напряжения. В рабочем устройстве маятник колебался с частотой в 100 МГц. Маятник C электрически изолирован от электродов G1, G2, S и D и заземлен. Электроды S и D представляют собой исток и сток транзистора соответственно. Как только маятник касается электрода S, на его поверхность благодаря туннельному эффекту переносится один электрон, который затем передается с помощью колебаний маятника на электрод D. На схеме показан источник напряжения транзистора V_{SD} и прибор, с помощью которого исследователи могли наблюдать за переносом электронов I_{SD} .

¹ Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 1.



Осциллятор исследователи изготовили из кремния по технологии SOI (silicon-on-insulator). Устройство производилось в несколько этапов. Сначала исследователи с помощью электронно-лучевой литографии нанесли на кремниевую поверхность золотую маску, которая повторяла геометрию устройства, а также алюминиевую маску травления (для тех участков на матрице, которые надо удалить). Далее был вытравлен механический маятник (посредством комбинации мокрого и сухого травления). И в заключение исследователи вытравили туннельные контакты маятника (с точностью до 10 нм).

Первые опыты по запуску транзистора исследователи провели при комнатной температуре. Напряжение, приводящее в движение маятник, было ± 3 В. Путем изменения частоты маятника исследователи определили оптимальные значения для переноса электронов маятником. Расстояние между электродами S и D составило 300 нм, а емкость перехода S – D составила 84 аттофарады. При напряжении $V_{SD} = +1$ В маятник мог перенести +527 электронов. Но это довольно много. Изменив напряжение, подаваемое на транзистор, Блайк добился эффекта переноса отдельного электрона. Далее исследователи снизили температуру устройства до 12 К. И тут они обнаружили, что устройство ведет себя по-другому. Протестировав транзистор на ряде значений напряжения V_{SD} (от 0 до 10 мВ) и изменяя частоту вибрации маятника, они отметили, что при частоте вибрации «механической руки» в 120 МГц он ведет себя как и при комнатной температуре. Видимо, это объяснялось влиянием тепловых эффектов, которые сильно проявлялись при комнатной температуре. Дальнейшее снижение температуры до 4 К не дало никаких результатов – транзистор отказал, так как его маятник стал жестче и потерял туннельный контакт между электродами S и D.

В обычных микроэлектронных транзисторах переносится около 100 000 электронов для того, чтобы обеспечить состояние «1» или «0». В новом электромеханическом транзисторе эту роль выполняет один электрон. Преимущества нового устройства – в отсутствии тепловых шумов, так как сток и исток физически разделены. Также уменьшится энергопотребление устройства, собранного на этих транзисторах.

Применение маятника в качестве переносчика электронов позволит транзистору работать в условиях повышенной радиоактивности, говорит Блайк. Поэтому одним из применений механотранзистора станет спутниковая электроника.

Летом 2004 г. Блайк и Шебли разработали технологию, по которой производить такой транзистор стало проще. Транзистор 2001 г. нельзя было поставить на поток, а транзистор 2004 г. – можно. Производство по новой технологии сводится всего к двум шагам: электронной литографии и травлению. Как говорит Блайк: «Почему мы не додумались до этого раньше [в 2001 г.] – никак не можем понять». Ученые запатентовали производственный процесс и сам транзистор.



Наномеханическая память вскоре заменит традиционную магнитную¹

Новая технология не предполагает возврата к перфокартам и подобным немагнитным способам хранения информации. С 2000 г. профессор физики Бостонского университета Притирэй Моханти старался создать более эффективные системы хранения информации на основе наномеханических осцилляторов. Моханти изготовил механические ячейки памяти из кремния, которые в 1000 раз меньше диаметра человеческого волоса.

Если использовать эти наноустройства в качестве элементов хранения информации, то полученная механическая память будет выгоднее по плотности информации, чем современные электромагнитные системы. Моханти заявил, что механопамять обгонит по емкости даже те магнитные устройства, которые по нынешним технологиям изготовления приближаются к физическому пределу плотности информации для магнитных устройств. Механопамять может работать, выполняя миллионы и миллиарды циклов в секунду. Также Моханти сказал, что механические ключи новой памяти потребляют в миллион раз меньше энергии, чем их электронные аналоги. «Это будущий новый игрок на рынке устройств хранения информации, — объяснил Моханти. — Взяв старые принципы за основу и воспользовавшись последними достижениями в области микроэлектромеханических систем (МЭМС) и нанотехнологий, мы можем производить компьютерную память, которая будет быстрее, дешевле и меньше современной электронной. Эти наномеханические устройства — новое слово в области хранения данных».

С помощью электронно-лучевой литографии исследователи сделали «шаблон» для матрицы механических ключей и вытравили их из монокристаллического слоя кремния, покрытого слоем оксида кремния. Электронно-лучевая литография уже давно используется МЭМС- и нанотехнологами в качестве основного производственного инструмента. Она также является основным инструментом для производства микроэлектронных схем; ею пользуются при массовом производстве микросхем и процессоров. Так что для массового производства механопамяти не нужно будет использовать дополнительные устройства, готовый продукт можно производить на уже имеющемся оборудовании (рис. 3.3).

Одиночная ячейка памяти состоит из струны нанометровых размеров, которая при воздействии на ее концы высокочастотного напряжения (с частотой в несколько мегагерц) изгибается. При определенной амплитуде напряжения струна принимает одно из конечных состояний («1» или «0»), что как раз нужно для хранения информации.

¹ Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 1.

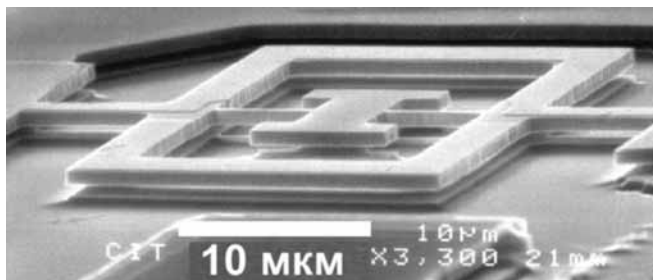


Рис. 3.3. Основа механопамяти – осциллятор

Маленькие размеры устройства позволяют ему достичь высокочастотных вибраций (в опытах – до 23,57 МГц). Эта частота отражает скорость чтения записанной информации. Для сравнения, винчестеры в современных ноутбуках характеризуются скоростью считывания информации в несколько сотен килогерц (тысяча циклов в секунду). Исследователи заверяют, что наномеханические ключи могут достичь скорости до миллиарда циклов в секунду. При этом их размеры могут быть меньше тех, которые изготовлены экспериментально Моханти и командой.

Другие преимущества наномеханики перед наноэлектроникой заключаются в том, что диапазон вибрации наноструны составляет несколько ангстремов. Для вибрации в таком диапазоне устройство потребляет всего несколько фемтоватт электроэнергии, в то время как современные ключи потребляют милливатты. Механическая память также свободна от ограничений суперпарамагнитного эффекта, который определяет граничные размеры магнитной памяти. Память на механотранзисторах может существенно превзойти плотность хранения информации около 100 Гбит на квадратный дюйм.

Техническое описание новой технологии, характеристики и изображения механических ячеек памяти даны в выпуске Applied Physics Letters от 18 октября 2004 г. Работы финансировались грантом от программы по нанотехнологическим исследованиям National Science Foundation, а также грантом от Министерства обороны США.

Механическая память на основе НЭМС¹

Основа механоэлектрической молекулярной электроники – молекулы, которые при воздействии извне могут изменять свое электрическое состояние или конфигурацию. Исследователи из Калифорнийско-

¹ Nanotechnology-Now: Rapid Progress Reported In Emerging Field Of Molecular Electronics; Stoddart Supramolecular Chemistry Group, UCLA: Molecular Electronics (18 декабря 2004 г.).



го института давно занимаются механоэлектрическими системами, на основе которых можно создать ряд наноэлектромеханических систем (НЭМС): актюаторы и механическую память. О последних достижениях в этой области ученые доложили в декабрьском выпуске журнала Science 2004 г. – о НЭМС, с помощью которых исследователи надеются создать механоэлектрическую память.

«Современная молекулярная электроника находится в зародышевом состоянии, – говорит Амар Флуд, исследователь из UCLA и автор публикации в Science. – Необходимо пояснить, что молекулярная электроника – это комбинация активных молекул и электронных схем. Пока еще рано говорить о том, как быстро результаты этой “свадьбы” появятся на рынке, но ее вклад в развитие науки уже очевиден».

Одно из первых применений молекулярных машин, которые уже изготовлены учеными, – механоэлектрическая память. Первые попытки создать из отдельных молекул механические системы были предприняты Флудом, Стоддартом и их командой еще в 1996 г. В середине 2004 г. им удалось создать молекулярный элеватор – НЭМС, которая состоит из стержня и молекулы-лифта. При подаче электрического потенциала на элеватор молекула-лифт передвигалась вдоль стержня. Направление движения элеватора можно было изменить, переключив полярность активирующего потенциала. Различные типы элеваторов можно увидеть на рис. 3.4.

Нужно отметить, что эта НЭМС активируется не только электричеством, но и световой энергией, а также определенными химическими катализаторами. В качестве лифта в системе 1-го типа ученые использовали молекулу правильного ротаксана, в системе 2-го типа – молекулу катенана и в системе 3-го типа – молекулу псевдоротаксана.

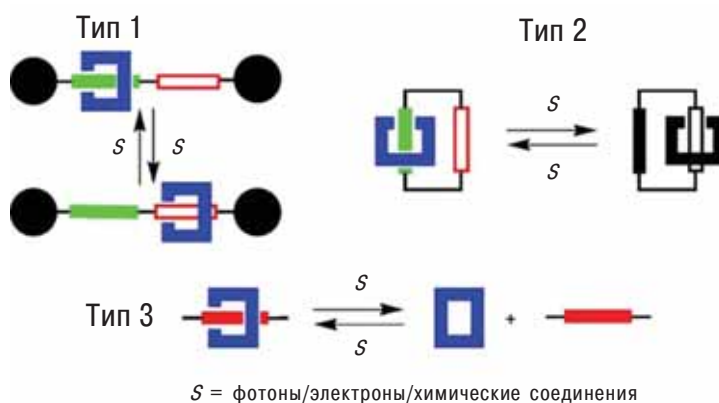


Рис. 3.4. Типы молекулярных элеваторов

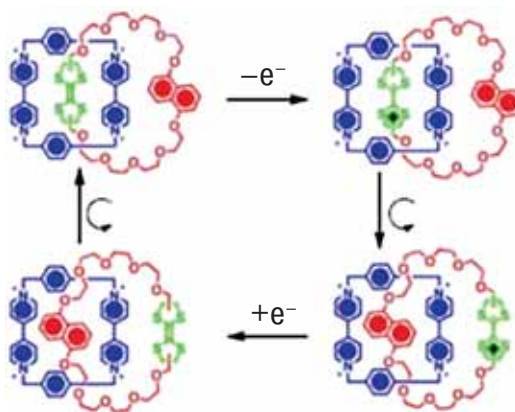


Рис. 3.5. Активация молекул ротаксана и катенана

Эти молекулы особенны тем, что при захвате молекулой электрона она может изменить свой энергетический потенциал, а находясь в составе наносистемы — изменить положение в пространстве. Так, ротаксаны в наносистемах движутся линейно, в то время как катенаны вращаются вокруг оси стержня, на котором находятся (рис. 3.5).

Этот же принцип применялся исследователями при конструировании памяти. Как говорит Флуд, они спроектировали 64-битную RAM-память на основе НЭМС-ячеек, использующих ротаксаны. При этом размеры новой памяти бьют рекорды, установленные законом Мура.

Флуд и Стоддарт уже создали элементарную ячейку памяти, которая переключается в логическое состояние «1» и «0» при подаче на нее электрического потенциала. На рис. 3.6 можно видеть принцип действия новой НЭМС-памяти.

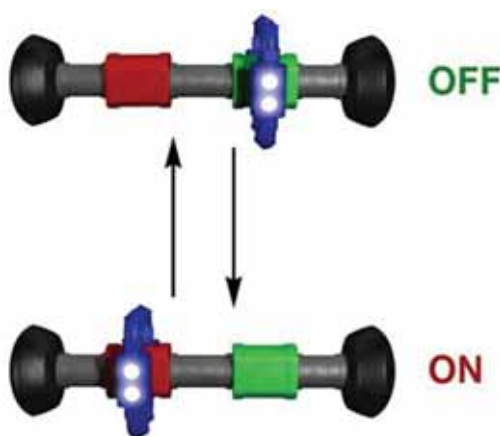


Рис. 3.6. Модель молекулярной памяти на основе молекул ротаксанов



«Когда мы подали положительный импульс на ячейку, молекула ротаксана передвинулась в состояние «1», а когда мы изменили полярность напряжения, она переместилась к положению, обозначающему «0», — сказал Стоддарт. — Мы проверили работу устройства, заставив его длительно переключаться. При этом мы смогли менять скорость переключения! Мы изменяли частоту переключения от 10 000 раз в секунду до 10 раз. При этом, когда молекулы находились в разных средах, скорость переключения также менялась».

Самое интересное в исследовании состоит в том, что, используя различные полимеры в качестве основы для перемещения ротаксанов, ученые добились изменения цвета молекулы (т.е. изменение в излучаемом свете). В опыте применялись переключатели с красного на зеленый! По словам Стоддарта, новые устройства могут работать даже в дисплеях! При этом дисплеи будут механическими, т.е. принципиально новыми для современной компьютерной промышленности! Но конечно, до создания только прототипов таких устройств еще далеко — от трех до пяти лет.

«Мы очень гордимся тем, что нам удалось создать принципиально новые наносистемы. Я думаю, что это один из шагов к тому, что называют молекулярным производством», — закончил Стоддарт.

«Многоножка» стартует с 10 Гб¹

11 марта 2005 г. стало знаменательной датой в истории устройств хранения данных. На выставке CeBit в Ганновере компания IBM представила работоспособный чип устройства квантового хранения данных — «Millipede» («Многоножка»). Это новое устройство хранения данных, которое, по прогнозам IBM, заменит существующие чипы flash-памяти. До сего времени «Многоножка» существовала в виде ряда прототипов и концептуальных моделей. Теперь в свет вышел полностью работоспособный чип.

«Многоножка» представляет собой «чистую» цифровую технологию. Принцип ее работы можно сравнить с работой старых проигрывателей грампластинок, в которых считывающая вибрирующая игла скользила по борозде, несущей информацию, только у «многоножки» есть ряд кантилеверов, которые скользят по поверхности хранения данных, на которой есть углубления, кодирующие «1» и «0». Таким образом, отклонения кантилеверов от равновесного положения переводятся в набор 0 и 1.

Этот чип, в отличие от прототипов (которые содержали около трети АСМ-зондов), состоит из матрицы, содержащей 4096 кантилеверов, выполненных как устройства чтения/записи (подобные кантилеверы используются сейчас в атомно-силовых микроскопах). На рис. 3.7 можно увидеть, как устроена «Многоножка».

¹ The «Millipede» — Nanotechnology Entering Data Storage ([http://domino.research.ibm.com/comm/pr.nsf/pages/rscd.millipede-picg.html/\\$FILE/pv7201-preprint.pdf](http://domino.research.ibm.com/comm/pr.nsf/pages/rscd.millipede-picg.html/$FILE/pv7201-preprint.pdf)).



«Многоножка» стартует с 10 Гб

69

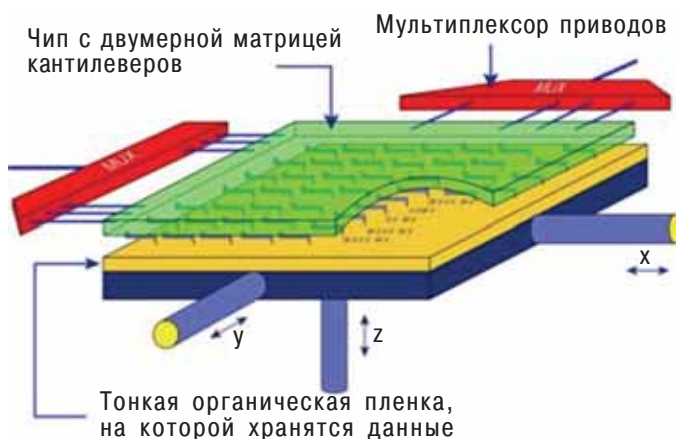


Рис. 3.7. Принцип действия «Многоножки»

Благодаря нанотехнологиям чип изготовлен по 10-нанометровому техпроцессу, позволяющему размещать на органической пленке (которая выступает в качестве носителя информации) углубления диаметром 10 нм. Расстояние между углублениями составляет 100 нм, что позволило разместить на чипе довольно большую матрицу атомно-силовых кантилеверов.

Наличие углубления соответствует логической «1», а его отсутствие – логическому «0». Кантилевер – это специальный атомно-силовой зонд (рис. 3.8), который «ощупывает» сканируемую поверхность, изменяя свое положение в пространстве в зависимости от того, встретит он на пути углубление или нет.

При чтении данных специальный привод кремниевого «стола», на котором размещена пленка с данными, перемещает ее в плоскости по заданным координатам X и Y . А привод мультиплексора позволяет управлять каждым кантилевером индивидуально, обеспечивая адресацию памяти. При этом матрица кантилеверов обеспечивает параллельное чтение/запись данных.

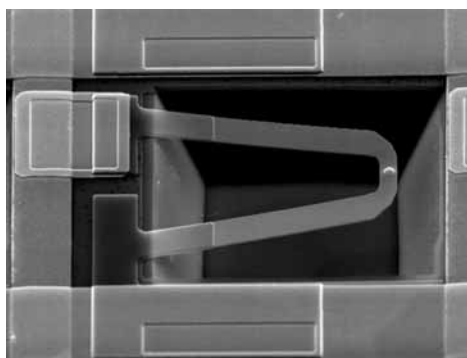


Рис. 3.8. Кантилевер «Многоножки»

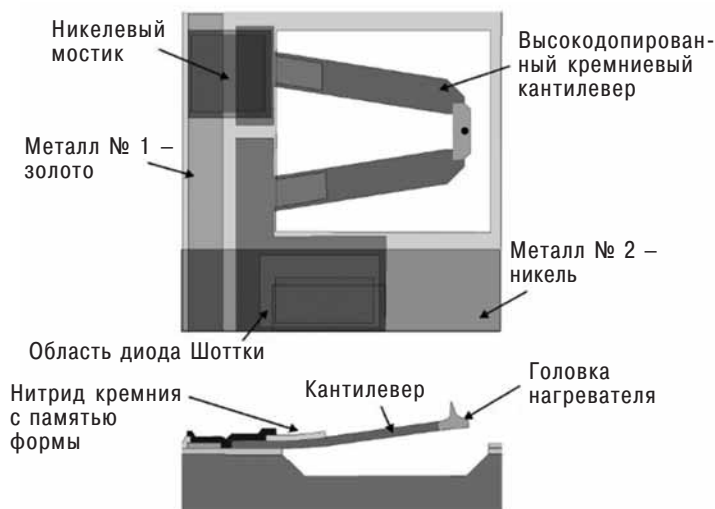


Рис. 3.9. Строение отдельного термомеханического кантилевера

Каждый кантилевер производит операции «чтения/записи» только в отведенной для него области. Операция записи происходит термомеханическим путем с помощью головок кантилеверов (рис. 3.9). Для поддержания постоянной температуры пленки, необходимой для проведения процедур записи и стирания данных, на чипе находится ряд нагревательных элементов. Толщина слоя ПММА (ПММА – полиметилметакрилата), на котором хранятся данные, – 70 нм. Принцип работы устройства в целом позаимствован у систем, работающих с перфокартами. Но в отличие от бумажных перфокарт, «Многоножка» умеет стирать продырявленную ею информацию (благодаря пластическим свойствам ПММА и ряду нагревательных элементов).

Уже готовый выставочный чип может хранить 1,2 Гбит (или 153 Гбайт) на площади в квадратный дюйм. Для сравнения представьте чип размерами с почтовую марку, на которой можно записать содержимое 25 DVD-дисков. Размеры матрицы 4096 кантилеверов, представленной на выставке в Ганновере, – 6,3×6,3 мм.

На рис. 3.10 можно увидеть строение чипа, состоящего из матрицы 32×32 кантилеверов (что в 4 раза меньше существующей). Отдельно показаны сенсоры температуры и нагреватели, которые формируют необходимую для работы температуру слоя ПММА. А на рис. 3.11 показано готовое устройство с 4096 кантилеверами, которое было представлено на CeBit в Ганновере.

Следующие устройства на основе технологии «Многоножки» будут иметь емкость 100 Гбит при размерах обычных SD-карт. Как утверждает Йоханнес Вайндлен, менеджер проекта, минимальная емкость «Мно-



«Многоножка» стартует с 10 Гб

71

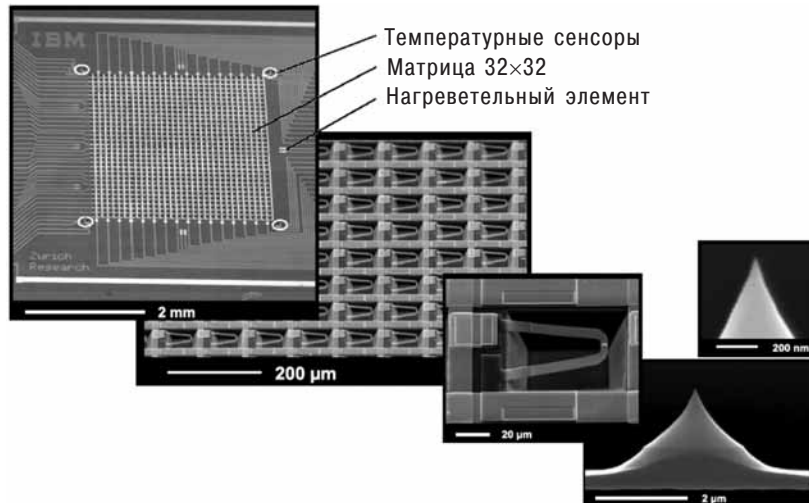


Рис. 3.10. Структура чипа «Многоножки» с 1024 кантилеверами

гоножки» составит 10 Гбит. Вайндлен также отметил, что IBM уже способна изготовить «Многоножки» в серийном исполнении на базе кремниевых МЭМС.

Как мы видим, электроника медленно, но уверенно перемещается в область нанотехнологий. И объявления компаний HP и IBM – тому пример.

Компания IBM сообщила также, что эта переломная технология завоеует рынок к 2007 г. Если летом 2004 г. IBM заявляла, что определяется – будет ли «Многоножка» продуктом или нет, то сегодня выставка в Ганновере дала ответ на этот вопрос. Теперь остается ждать «Многоножку» в серийном производстве.

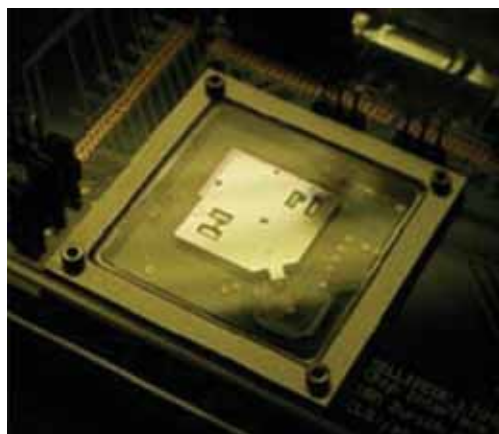


Рис. 3.11. Чип, представленный в Ганновере



Память объемом в 100 Гбайт благодаря нанотехнологиям¹

Исследователи при лондонском Imperial College объявили о том, что разработали новую технологию, которая позволит создавать трехмерные микрочипы (рис. 3.12). На их основе можно будет создавать модули памяти очень высокой, по сегодняшним меркам, емкости.

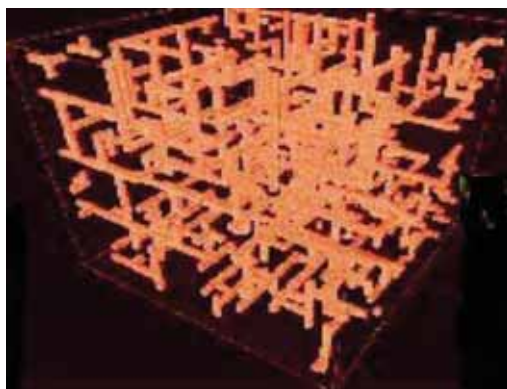


Рис. 3.12. Пример трехмерного чипа по типу нейросети

Новый чип может вмещать большой объем данных на малой площади, для этого используется сложная сеть взаимосвязанных нанообъектов — узлов сети. В этих же узлах могут быть задействованы базовые вычислительные функции, т.е. это что-то весьма напоминающее нейронную сеть с ее нейронами и аксонами.

Последние исследования ученых из Университета Шеффилда и Университета Дурхэма позво-

ляют рассчитывать на то, что на основе данной технологии в скором времени можно будет создавать носители памяти, сравнимые по емкости с современными жесткими дисками, но при материальных затратах на производство таких же носителей, как у микросхем памяти. Таким образом, емкость микросхем памяти можно будет увеличить до 0,5–100 Гбайт!

Рассел Коуберн, профессор нанотехнологии при Imperial College, отметил: «Новые мобильные телефоны со встроенным видео популярны сейчас, но им не хватает того объема памяти, которым они сейчас комплектуются или которым могут быть расширены. Наша технология позволит превратить их в полноценные многофункциональные устройства».

Технология основана на исследованиях Коуберна и его коллег. Они обнаружили, что с помощью нанотехнологии можно репродуцировать ключевые функции современных и привычных полупроводниковых продуктов. При этом используется лишь спин электрона, который отвечает за магнетизм. Сейчас команда профессора Коуберна работает над воплощением технологии в реальных продуктах.

¹ ИХВТ: Память объемом в 100 Гбайт благодаря нанотехнологиям!



Магнитная flash-память на основе углеродных нанотрубок¹

Известно, что размеры углеродных нанотрубок сопоставимы с размерами молекул. Средний диаметр однослойной углеродной нанотрубки составляет около 1 нм. Если же удастся «заставить» одну нанотрубку хранить один бит информации, то память на их основе будет хранить колоссальные объемы информации, ведь современные ячейки flash-памяти, хранящие один бит информации, имеют размеры от 50 до 90 нм.

Ученые из Техасского университета уже довольно давно работают над проблемой создания flash-памяти на основе углеродных нанотрубок. Исследователи хотят добиться плотности хранения информации около 40 Гбит/см. Но и это еще не предел. Как утверждают исследователи, расположив нанотрубки в различных слоях памяти, можно создать трехмерный чип flash-памяти, который будет хранить информацию до 1000 Тбит/см. Для сравнения, 1 Тбайт – это количество информации, которое можно записать на 26 DVD-дисках.

Архитектура flash-памяти на основе нанотрубок довольно проста (рис. 3.13): каждая ячейка памяти состоит из двух пересекающихся нанотрубок, содержащих внутри примеси железа или помещенных в ферромагнитное окружение. Ученые собираются хранить информацию в нанотрубках, используя принцип магнитной записи, аналогичный тому, что применяется в компьютерных винчестерах. В роли носителя информации выступит матрица нанотрубок. Как говорит один из исследователей, Лазло Киш: «...В матрице нанотрубок каждое место их пересечения может хранить один бит информации».

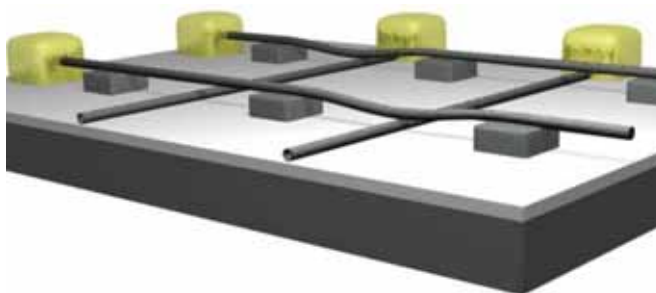


Рис. 3.13. Матрица ячеек памяти из нанотрубок

¹ TRN: Nanotube memory scheme is magnetic (http://www.trumag.com/Stories/2005/051805/Nanotube_memory_scheme_is_magnetic_051805.html).



Ток, протекающий через немагнитный слой, окруженный двумя намагниченными слоями, зависит от их магнитной ориентации в пространстве. Каждый электрон имеет свою магнитную ориентацию, поэтому слои, ориентированные согласно с электронами, не будут препятствовать протеканию тока, в то время как слои, ориентированные противоположно, будут препятствовать протеканию тока.

В нанопамяти роль слоев будут играть пересекающиеся нанотрубки, магнитную ориентацию которых можно будет менять с помощью электрических импульсов различной полярности. А считывать логическое состояние «1» или «0» будут более слабые электрические сигналы определенной полярности. Таким образом, если магнитная ориентация нанотрубок установлена противоположно посылаемому импульсу считывания, то по низкой амплитуде тока импульса будет определяться значение «0». И наоборот, если магнитная ориентация нанотрубок совпадает с направлением электронов в импульсе, то амплитуда тока импульса будет соответствовать логической «1». Полученная память будет энергонезависимой, т.е. при снятии напряжения с устройства данные на чипе будут храниться.

Как мы говорили ранее, нанотрубки характеризуются довольно малыми размерами и хорошей проводимостью электричества. «Благодаря этим двум факторам можно сделать предположение, что готовый чип будет хранить достаточно много информации и потреблять при работе мало энергии. Также скорость чтения/записи будет высокой – до 1000 Гбит в секунду», – говорит Киш.

Однако память на основе нанотрубок – только проект. В этом году ученые планируют изготовить прототип одной ячейки хранения данных для того, чтобы узнать, при каком напряжении и в каких условиях будет работать новое наноустройство. Далее, собрав несколько элементов в трехмерный слой, исследователи хотят создать первый трехмерный чип памяти. Как заявляет руководитель работ профессор Аджаян, прототип рабочего трехмерного чипа будет готов уже через пять лет.

Известно, что потребовалось около 15 лет для того, чтобы создать интегральные компьютерные чипы, разработанные Нобелевским лауреатом Джекком Килби. Работа над элементами на основе нанотрубок находится в таком же зачаточном состоянии, как и изготовление первого транзистора, поэтому внедрения этой технологии в наноэлектронику придется подождать.

О результатах своей работы ученые доложили в февральском выпуске журнала *Applied Physics Letters* 2005 г.



Открытые микрожидкостные и наножидкостные системы¹

Уже не секрет, что химические и биохимические экспресс-лаборатории будущего уменьшатся до размеров компьютерного чипа (речь идет о так называемых лабораториях-на-чипе). Это позволит сделать анализы химических и биологических объектов более быстрыми и точными. Принцип действия лаборатории-на-чипе состоит в том, что она сортирует вещества с помощью ряда каналов диаметром в несколько десятков нанометров. На основе лабораторий-на-чипе можно создать простые, эффективные и быстродействующие анализаторы крови. Если сегодня процедура анализа крови занимает около трех дней, то с использованием наножидкостных устройств этот срок может сократиться до получаса. При этом анализ будет выполнен с высокой степенью точности.

Однако массовое изготовление закрытых микрожидкостных систем сопряжено с определенными трудностями. Открытые микро- и наножидкостные системы, позволяющие осуществлять транспорт веществ, до сих пор не могли сконструировать из-за того, что оптимальная геометрия каналов таких устройств не была разработана.

Основа открытых микрожидкостных систем — сеть каналов, вытравленных на подложке (как правило, это кремний). Матрицы с открытыми каналами достаточно просто производить в больших количествах с помощью хорошо развитой на сегодняшний день фотолитографии. Недавно совместными усилиями ученых из Института им. Макса Планка (Германия) и их коллег из Калифорнийского университета была разработана теория открытых нано- и микрожидкостных структур. Применение этой теории в изготовлении лабораторий-на-чипе позволит наладить их массовый выпуск.

Основа теории расчета капилляров заключается в определении их геометрии в зависимости от смачиваемости транспортируемой по ним жидкости. Простейший вид геометрии капиллярных каналов микрожидкостных систем — прямоугольный. На первый взгляд кажется нелепостью делать такие устройства с открытыми каналами для транспорта жидкости. Однако на микро- и наноуровне жидкости ведут себя не так, как мы привыкли считать. Дело в том, что в микро- и наножидкостных системах важную роль играют капиллярные силы и силы поверхностного натяжения.

Исследователи попытались изучить морфологию протекания жидкости через открытые каналы с различной геометрией. Для этого они использовали быстро замерзающую полимерную жидкость. На рис. 3.14 можно видеть микрофотографии и 3D-структуры, полученные с помощью атомно-силовой микроскопии.

¹ Eurek Alert: Open microfluidic and nanofluidic systems.



76

Глава 3. Нанодатчики и наноустройства

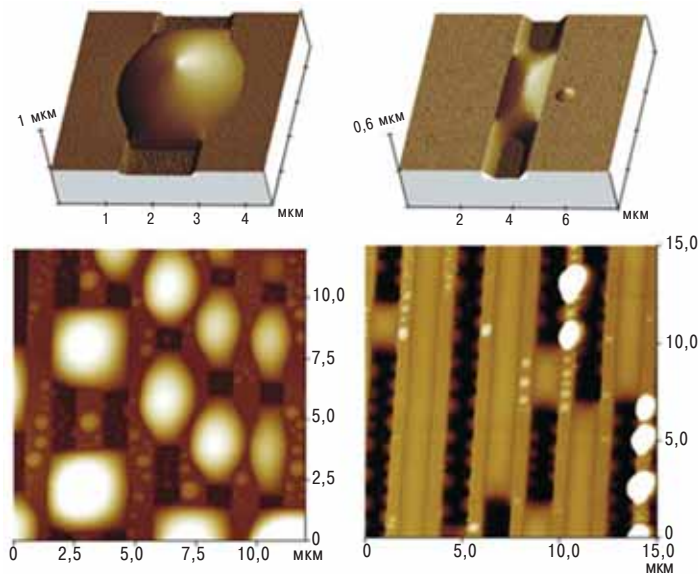


Рис. 3.14. Морфология протекания жидкости по каналам

Как мы видим, морфология достаточно разнообразна — жидкость то вытягивается вдоль канала, то собирается каплями.

На рис. 3.14 справа можно увидеть канал шириной 1 мкм, заполненный жидкостью. А в канале большей ширины, который представлен слева, жидкость образовала каплю. Также в процессе исследований было установлено, что наиболее сильные капиллярные силы образуются в канале, который имеет поперечное сечение в виде равнобедренной трапеции. Ученые также определили, что зависимость капиллярных сил от угла наклона контактных поверхностей не согласовывается с классическим уравнением Юнга. Поэтому исследователи разработали собственную теорию смачивания в наноразмерном диапазоне. Одним из интересных следствий новой теории является то, что давление жидкости в открытом канале шириной 100 нм может достигать 15 атмосфер! Если же расширить канал до 1 мм, то вступят в силу классические законы и давление упадет до тысячной доли атмосферы.

Одним из практических применений новой теории будет изготовление открытых микрожидкостных систем с изменяющейся геометрией каналов. Таким образом, можно будет управлять их смачиваемостью и даже регулировать проток жидкости через них. Также каналы можно сделать смачиваемыми только для определенного типа жидкости (выбрав нужный тип геометрии), что позволит сделать простые селекторные чипы.



Ученые построили первый наножидкостный транзистор для химических компьютеров¹

Исследователи из Университета Калифорнии в Беркли создали первый в мире наножидкостный транзистор как на основе наноканалов, так и на основе нанотрубок.

Термин «наножидкостный» означает, что устройство контролирует перемещение жидкости и определенных ионов через каналы субмикрометрового диаметра (рис. 3.15). Ранее удавалось создавать наножидкостные каналы диаметром до 30 нм. Наножидкостные системы уже используются в лабораториях-на-чипе и гибридных нанoeлектронных устройствах, позволяющих получить электроэнергию от протекающих биохимических процессов в живых клетках, находящихся *in vitro* (внутри) чипа.

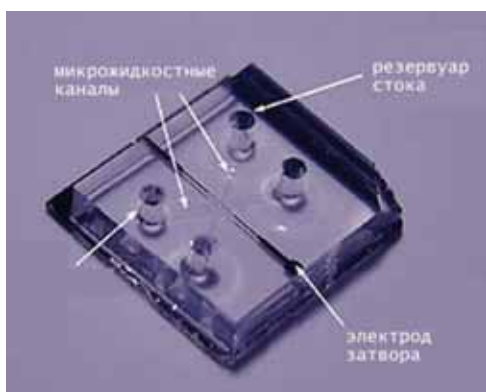


Рис. 3.15. Структура наножидкостного транзистора

Авторы новинки – химики и инженеры – предсказывают, что подобно тому, как электронные полупроводниковые транзисторы послужили кирпичиками для микросхем, наножидкостный транзистор послужит основой для миниатюрных химических заводов «на чипе», работающих без единой подвижной детали.

«Транзистор походит на клапан: вы используете электричество, чтобы открыть или закрыть его, – объяснил Арун Маджумдар, один из авторов проекта. – Здесь же мы используем напряжение, чтобы открыть или закрыть ионный канал. Теперь, когда мы построили этот стандартный блок, мы можем приспособить его к электронному чипу, чтобы управлять химрастворами».

Устройства на основе нового транзистора могут диагностировать заболевания, в частности рак на ранней стадии. Теоретически чип может обработать всего 10 раковых клеток, выделив из них белковые маркеры, характерные именно для этого типа заболевания. А с помощью таких индивидуальных меток врач сможет провести более эффективную диагностику и последующее лечение заболевания.

¹ Berkley: Researchers create first nanofluidic transistor, the basis of future chemical processors.



«Химические компьютеры – идеальный инструмент для изучения белков и ферментов. Также они откроют новый этап развития технологии идентификации различных химических соединений: от белков до живых клеток, – говорит Арун. – Идентификация белков–маркеров раковых клеток на начальных стадиях заболевания позволит ученым эффективнее бороться с раком и другими болезнями».

Коллега Аруна, Пейдонг Янг, построил аналог наножидкостного транзистора с использованием нанотрубок в роли проводящих каналов (рис. 3.16).

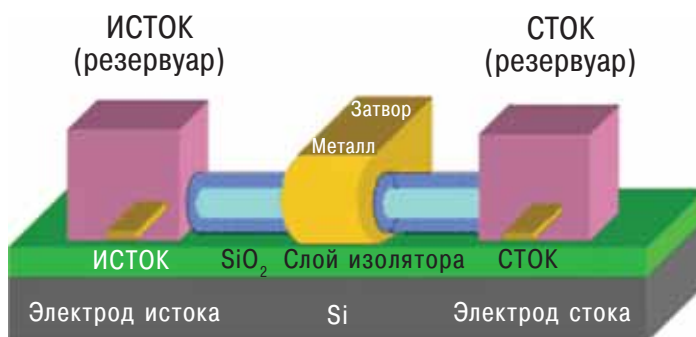


Рис. 3.16. Нанотранзистор с каналом из нанотрубки на кремниевой плате

После проведения ряда тестов над экспериментальным чипом наножидкостного транзистора Янг был удивлен схожестью характеристик обычных MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) – металл-оксид-полупроводниковых полевых транзисторов и наножидкостного.

«Больше всего меня удивило то, что мы сможем сконструировать химические компьютеры, способные манипулировать молекулами так же, как полупроводниковые – электронами, – говорит Янг. – Тогда единицы информации будут представлять различные молекулы. Этот подход открывает совершенно новую область в теории информации».

Одно из преимуществ наножидкостного транзистора, по словам Аруна, – то, что технология массового производства лабораторий-на-чипе на его основе не отличается от технологий производства интегральных компьютерных чипов. Наножидкостные каналы можно легко интегрировать в полупроводниковые приборы. Так, например, электроникой можно управлять путем открытия или закрытия микрожидкостного канала. При этом электронные компоненты, позволяющие делать это, размещаются на плате обычными методами производства микроэлектроники. А микроканалы и резервуары наносятся на плату отдельно.



Основная деталь нанотранзистора, способного управлять потоком жидкости, — микроканал диаметром 35 нм, расположенный между двумя слоями диоксида кремния. Он наполнен водой с добавлением растворенных солей, образующих водные ионы. При подаче напряжения на затвор, аналогичный затвору полевого MOSFET-транзистора, протекание жидкости прекращается. Как видно, принцип работы наножидкостного транзистора полностью аналогичен принципу действия электронных транзисторов.

Подобное управление ионами в тонком канале (35 нм) невозможно другими способами, так как в жидкости ионы быстро перемещаются и могут потерять заряд, соприкоснувшись со стенками канала. Поэтому для каналов диаметром до 100 нм применяют электрическое экранирование. А напряжение, приложенное к разным концам канала, вызывает перемещение ионов от истока к стоку. Правда, значение напряжения для закрытия транзистора довольно велико: оно составляет 75 В.

Такой нанотранзистор можно использовать для детектирования химических соединений. Представим себе, что фрагменты ДНК, белки, ионы или ферменты перемещаются внутри канала, покрытого флуоресцентными метками. Таким образом, управляя потоком жидкости, можно добиться детекции даже одной молекулы. Исследователи в одном из экспериментов продемонстрировали, как с помощью нанотранзистора обрабатывались помеченные флуоресцентными красками сегменты ДНК.

Янг, специалист по изготовлению из нанотрубок и полупроводников нанoeлектронных устройств, создал аналог наножидкостного транзистора с каналом из углеродной нанотрубки диаметром 20 нм. При этом нанотранзистор показал характеристики, схожие с первым химическим транзистором.

«Нанотрубки позволяют пропустить через наножидкостный транзистор молекулы меньшего размера. С помощью современных методов производства мы не можем сделать каналы меньшего диаметра, — говорит Янг. — Поэтому я думаю, что в будущем химические транзисторы будут работать на основе нанотрубок».

«Мы делаем все возможное, чтобы наша команда первой создала что-то вроде химического процессора, способного сортировать и сравнивать молекулы между собой, как это делают с битами современные процессоры», — продолжает Маджумдар.

В перспективе группа наножидкостных транзисторов может образовывать целые вычислительные устройства, сходные с нынешними кремниевыми процессорами, что в сочетании с легким управлением ионами (а это могут быть, скажем, белки или фрагменты ДНК) сулит новые возможности для биологических исследований и медицины.

Сверхточный детектор массы и силы на основе нанотрубки¹

Физики из Университета Корнелла (США) сделали электромеханический резонатор нанометровых размеров, способный детектировать малые значения прикладываемой к нему силы. В качестве «рабочего органа» резонатора исследователи использовали нанотрубку (рис. 3.17), расположенную между двумя золотыми электродами (V. Sazonova и др. 2004 Nature 431 284).

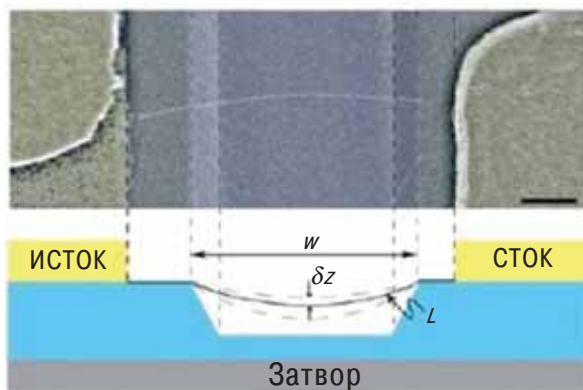


Рис. 3.17. Геометрия устройства и диаграмма расположения нанотрубки на электродах. Масштабная метка – 300 нм

Размеры канавки, через которую протянута нанотрубка: 1,5 мкм в длину и 500 нм в ширину (геометрия канавок вынесена штриховыми линиями).

Наноэлектромеханические системы (НЭМС) такого типа могут быть полезны при конструировании различных ультрачувствительных масс-детекторов и детекторов силы. В таких устройствах «рабочий орган» сенсора изменяет свое положение в зависимости от воздействия на него внешней силы.

Эта симуляция (рис. 3.18) отображает первые четыре резонансные состояния нанотрубки, жестко закрепленной с двух сторон. В. Сазонова и П. МакЮн рассчитали эти состояния и показали, что их можно «подстроить» под широкий спектр частот.

Углеродные нанотрубки – идеальные кандидаты для рабочего органа такого устройства, так как у них большая упругость. Это позволяет нанотрубке колебаться в широком диапазоне частот, а это, в свою очередь, необходимо для квантово-механических устройств. Более того,

¹ Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 1.

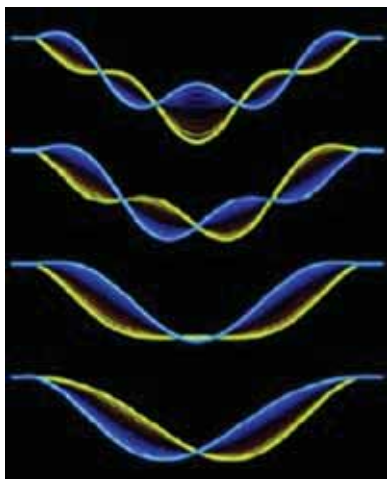


Рис. 3.18. Первые четыре резонансные состояния нанотрубки

нанотрубка может работать в качестве транзистора, что позволило исследователям определить частоту ее колебаний и смещения относительно положения покоя. Все сказанное выше характеризует однослойную углеродную нанотрубку как универсальный детектор массы и силы. В детекторе исследователи использовали нанотрубку диаметром 1...4 нм.

Пол МакЮн и его коллеги сделали детектор следующим образом: между двумя электродами, расположенными на желобке из оксида кремния, протянули нанотрубку, жестко закрепленную на концах. В результате получился транзистор. Электроды были стоком и истоком, а подложка с канавкой из оксида кремния — затвором.

Далее, изменяя напряжение на электродах, физики из Корнелла добились оптимального натяжения нанотрубки (за счет электростатического притяжения к затвору), а также заставили ее вибрировать. Теперь, измеряя изменения электрической емкости между нанотрубкой и затвором, можно было установить, насколько нанотрубка отклоняется от положения покоя, или же измерить частоту вибрации нанотрубки.

МакЮн и его команда смогли измерить резонансные частоты нанотрубки от 3 до 200 МГц. Также они смогли измерить смещение нанотрубки всего на 0,5 нм от положения равновесия. На сегодняшний день это лучшие результаты измерения массы, достигнутые при комнатной температуре.

Так как частота вибрации нанотрубки представляет собой функцию от ее массы, то добавление к этой массе посторонней массы изменит частоту колебаний. Проще говоря, если соединить с нанотрубкой очень маленький предмет, то можно будет его взвесить! Ранее на кремниевых кантилеверах можно было взвесить бактерию или вирус. Теперь, как говорит МакЮн, с помощью нового детектора «мы достигли границы в измерениях массы — теперь с помощью нашего устройства (наверняка при его модификации. — Прим. пер.) можно будет взвешивать отдельные атомы».

Исследователи проводили измерения в вакууме. В воздухе большое число разных молекул будет сталкиваться с нанотрубкой или даже абсорбироваться с ней, изменяя ее массу. Поэтому, как сказал МакЮн, одно из применений сенсора, которое лежит «на поверхности», — детектирование газов.



Датчик наноперемещений¹

В США создан датчик наноперемещений (рис. 3.19), позволяющий зарегистрировать изменение положения объекта на тысячные доли нанометра. Датчик состоит из наноэлектромеханической переключки и одноэлектронного транзистора. В устройствах такого типа механический элемент перемещается под внешним воздействием, а высокочувствительный детектор позволяет измерить его перемещение. Области применения устройства — везде, где требуется ультравысокая точность, например магниторезонансная микроскопия. Если удастся повысить его чувствительность в 100 раз, у ученых появится возможность непосредственной регистрации квантовых эффектов в макросистемах.

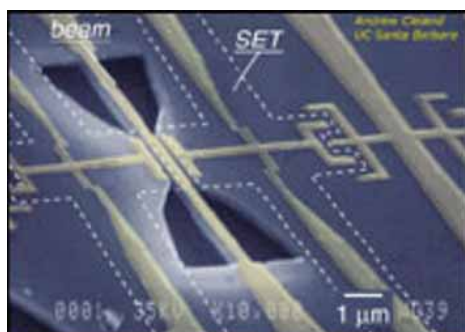


Рис. 3.19. НЭМС-датчик

Квантово-механический принцип неопределенности утверждает, что невозможно одновременно измерить и положение, и скорость (точнее, импульс) микрочастицы. Тем самым устанавливается фундаментальное ограничение на точность любых измерений макрообъектов. Правда, достигнуть этих теоретических границ в непосредственных измерениях до последнего времени было невозможно из-за отсутствия приборов с необходимой точностью. Точность наноэлектромеханических устройств уже достаточна для проведения подобных измерений.

Роберту Кнобелю и Эндрю Клиланду из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре удалось создать работающее устройство, в котором механический элемент представляет собой брусок из арсенида галлия, закрепленный с обоих концов. Длина бруска — 3 мкм, ширина — 250 нм, толщина — 200 нм. Расположен он в 250 нм от одноэлектронного транзистора, представляющего собой детектор перемещения. Брусок и транзистор соединены электрически через емкость. При приложении внешнего напряжения брусок начинает вибрировать. При его перемещении относительно детектора ток, протекающий через транзи-

¹ По материалам Physics Web.



стор, изменяется. Одноэлектронный транзистор, по словам изобретателей, представляет собой лучший из существующих детекторов заряда, имеющий чрезвычайно высокую чувствительность. Измерение тока, протекающего через транзистор, позволяет измерить частоту колебаний бруска.

В настоящее время ученые работают над тем, чтобы приспособить созданное устройство для измерения квантовых эффектов в макрообъектах.

НЭМС для взвешивания ДНК¹

Ученые из Корнеллского университета создали НЭМС-детектор, который может взвесить отдельную молекулу ДНК. Масса молекулы – около 995 000 дальтонов, в то время как масса бактерии – 655 фг. А вирус, который удалось взвесить ученым ранее, имеет массу 1,5 фг.

Более того, с помощью нового НЭМС-сенсора ученые могут определить число молекул ДНК, попавших на него.

Как надеются исследователи из Корнелла, новые НЭМС-сенсоры будут использоваться совместно с микрожидкостными системами для генетического анализа коротких фрагментов ДНК, присутствующих в живой клетке. Далее фрагменты ДНК реплицируются, используя технологию, названную PCR-усилением. Такой быстрый анализ ДНК может быть использован для детектирования маркеров раковых клеток.

Масса молекул белков и ДНК обычно выражается в дальтонах. Дальтон, или атомарный вес, – это масса одного протона или нейтрона. По отношению к другим единицам массы один дальтон – это одна тысячная зептограмма, который, в свою очередь, одна тысячная аттограмма, а он – тысячная фемтограмма. Как мы видим, со времени взвешивания вируса ученые далеко продвинулись в точных измерениях массы.

Ученые надеются, что им удастся взвешивать не только молекулы ДНК, но и отдельные белки, что поможет создать быстродействующие детекторы токсичных веществ. «Детектирование отдельных молекул определенного типа зависит от фундаментальных химических ограничений. Однако созданный нами НЭМС-детектор на несколько порядков точнее современных измерительных приборов, – говорит Гарольд Крэйгхед, глава исследователей из Корнеллского университета. – Я думаю, что взвешивание отдельных белков поможет при создании эффективного детектора таких заболеваний, как СПИД».

Как и в случае с вирусом, молекула ДНК помещалась на колеблющийся кантилевер, изменялась частота его колебаний, которая регистрировалась и обрабатывалась микропроцессором. Но на этот раз Крэйгхед и его команда сделали целую матрицу кантилеверов. Каждый был

¹ Nanotech-Now: From attograms to Daltons: Cornell NEMS device detects the mass of a single DNA molecule (<http://www.nanotech-now.com/news.cgi?storyid=09595>).



от 3 до 5 мкм в длину и 90 нм толщиной. В конце каждого кантилевера находился маленький золотой диск диаметром в 40 нм.

Далее ученые поместили матрицу кантилеверов в раствор, содержащий одинаковые ДНК, состоящие из 1578 пар нуклеотидов. Для экспериментальных целей молекулы были обработаны тиолом, благодаря чему они смогли легко присоединиться к золотым дискам на поверхности кантилеверов. По прошествии некоторого времени на наноустройстве оказалось довольно много молекул ДНК, связанных с кантилевером.

Воздействуя на кантилеверы лучом лазера, ученые добились частоты вибрации от 11 до 12 МГц. С помощью другого лазера исследователи измеряли частоту осциллятора в реальном времени. Далее НЭМС-весы были «оттарированы» — учеными установлена зависимость изменения частоты осцилляции от массы молекулы. Так, изменение массы кантилевера на 1 аттограмм приводило к изменению частоты на 50 Гц.

Для того чтобы построить работающий белковый и ДНК-анализатор, необходимо на НЭМС-осцилляторы нанести специальные маркеры, к которым и будут присоединяться взвешиваемые молекулы.

Как утверждает Крэйгхед, теперь дело за тем, чтобы собрать все части детектора в одно устройство, тогда можно будет говорить о действительно мобильных «нановесах».

Вращающийся нанопропеллер¹

Исследователи из Канады изготовили вращающийся ротор нанометровых размеров, который приводится в движение химическим топливом — перекисью водорода (H_2O_2).

Исследователь Джеффри Озин и его команда из Университета Торонто сначала изготовили ряд «штырей» длиной 300 нм, одна половина которых состояла из золота, а другая — из никеля. Далее исследователи скомпоновали из них ротор, похожий на пропеллер (рис. 3.20). Диаметр ротора составил около 1 мкм. Полученное устройство поместили на кремниевую матрицу, где ротор закрепили на миниатюрном подшипнике скольжения. Всю систему залили водой. Как только в воду был добавлен слабый раствор перекиси водорода (H_2O_2), пропеллер начал вращаться с постоянной скоростью. Как говорит Озин, открытие произошло случайно, исследователи не ставили перед собой целью создание пероксидного мотора. Цель их исследований — создание наноструктур различного типа, а добавление пероксида в раствор было всего лишь одним из тестов.

Расскажем подробнее, как работает новый актюатор. Эффект вращения получился благодаря тому, что лопасти пропеллера состоят из металлов, различным образом взаимодействующих с перекисью во-

¹ BBC: Nano-Propellers sent for a spin.

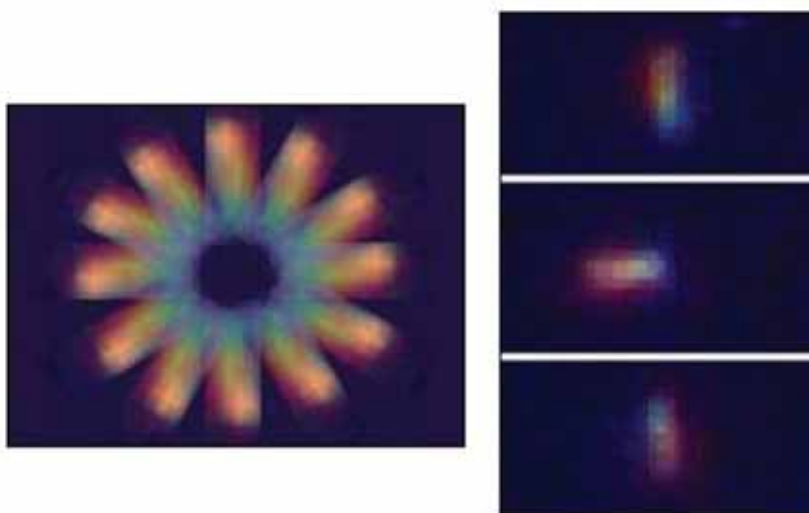


Рис. 3.20. Структура наноротора и положение лопастей в разные моменты времени

дорода. Золото не взаимодействует с перекисью, а лопасти пропеллера присоединены к валу золотым концом. А никель выступает в роли катализатора, помогая перексиду распадаться на кислород и воду. Таким образом, на никелевых концах с постоянной скоростью начали образовываться пузырьки кислорода, сразу же отрываясь от лопасти. Их движение, направленное от лопасти в окружающую среду, вызвало силу, которая, взаимодействуя на лопасти, заставила ротор вращаться.

При постоянной концентрации пероксида в растворе ротор вращался с постоянной скоростью. Исследователям даже удалось реверсировать направление вращения ротора. Но несмотря на то что полученный ротор «почти» наномашина, Озин сомневается в том, что именно такими двигателями будут в будущем приводиться в движение наносистемы. «Да, полученное нами устройство вращается. Да, практически во всех машинах есть моторы вращательного действия, которые приводят их в движение. Но этот мотор неуправляем, а это ограничивает его возможное применение в таких наномашинках, как наноманипуляторы и нанороботы», — заключил исследователь.

Напомним, что работы по созданию актюаторов вращательного действия ведутся уже давно. Ранее были созданы наномоторы на биологической основе (АТФ-синтеза) с использованием кремниевых НЭМС-устройств, а также молекул ДНК. Новый мотор представляет собой класс химических наномоторов, которыми исследователи еще всерьез не занимались.



Новый подход в наномоторах – использование силы поверхностного натяжения¹

Физики из США построили первый наноэлектромеханический актюатор, который использует эффекты поверхностного натяжения. «Релаксирующий осциллятор» состоит из двух капель жидкого металла на поверхности углеродных нанотрубок и приводится в движение слабым электромагнитным полем. Алекс Зеттл и его коллеги из Калифорнийского университета и Национальной лаборатории Лоуренса заявляют, что новый наномотор послужит приводным устройством для различных наноэлектромеханических систем (НЭМС).

Поверхностное натяжение играет большую роль в наноразмерном диапазоне. Уже в микронном диапазоне оно имеет доминирующее значение по сравнению с другими силами. Вот почему, например, некоторые насекомые могут ходить по поверхности воды. Слабое электромагнитное поле может изменять поверхностное натяжение капель жидкости, и это применяется в таких устройствах, как струйные принтеры. Но до сих пор эту силу не рассматривали в качестве движущей.

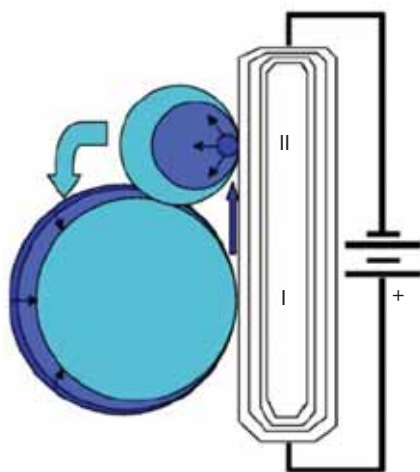


Рис. 3.21. Принцип действия наномотора

Схематическое изображение наноэлектромеханического релаксирующего осциллятора «две капли жидкости», обозначенные I и II и расположенные на поверхности углеродной нанотрубки, показано на рис. 3.21. Электрический ток, протекающий по нанотрубке, вызывает миграцию отдельных атомов капель вдоль поверхности нанотрубки от капли I к капле II (направление показано маленькой стрелкой). Радиус

¹ New look for nanomotors (<http://www.nanotechweb.org/articles/news/4/3/11/1>).

маленькой капли II увеличивается быстрее, чем уменьшается радиус капли I. Процесс длится до тех пор, пока капли не соприкасаются друг с другом. Силы поверхностного натяжения заставляют капли поменяться местами, используя созданный касанием гидродинамический канал. Затем цикл повторяется. Частота перемещения капель зависит от величины постоянного напряжения, приложенного к нанотрубке.

Осциллятор, изготовленный Зеттлом и его коллегами, состоит из «большой» капли жидкого индия диаметром 90 нм, расположенной рядом с «маленькой», диаметром 30 нм (рис. 3.21). Цикл осциллятора состоит из быстрой «релаксации» и медленного «восстановления» капель. Группа исследователей запустила мотор с быстрой фазы «восстановления», приложив постоянное напряжение к нанотрубке, заставив атомы мигрировать от одной капли к другой.

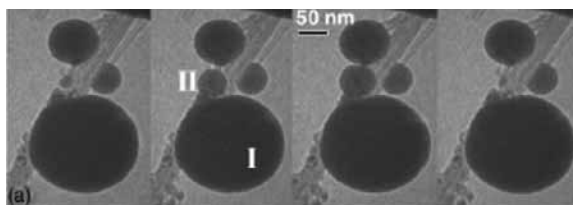


Рис. 3.22. Микрофотографии нанoeлектромеханического осциллятора

Ряд микрофотографий (рис. 3.22), полученных с помощью ТЭМ (просвечивающий электронный микроскоп), показывают один период колебания осциллятора. Вторая фотография слева показывает обмен жидким металлом между каплями I и II. Нанотрубка, видимая на фотографиях, служит нанопроводником электрического тока. На первом изображении капля II еле видна, но уже на третьем она увеличилась до соприкосновения с каплей I. На четвертом кадре можно видеть состояние осциллятора после релаксации, соответствующее началу цикла.

С помощью камеры, встроенной в ТЭМ, исследователи наблюдали процесс переноса атомов от одной капли к другой. Как только капли соприкасались друг с другом, между ними возникал гидродинамический канал, который способствовал ускоренному перетеканию атомов металла, и таким образом капли менялись местами. Со временем этот процесс повторялся (рис. 3.22).

Зеттл и его команда уверены, что смогут увеличить частоту работы осциллятора, увеличив амплитуду постоянного напряжения, подаваемого на нанотрубку. В работающем наномоторе цикл обмена каплями протекает за 200 пс при приложенном напряжении в 1,3 В. Если ученые повысят напряжение до 1,5 В, то частота устройства войдет в гигагерцевый диапазон.



88

Глава 3. Нанодатчики и наноустройства

Газовый наносенсор на основе проводящего полимера¹

Исследователями из Национального института стандартов и технологий США (NIST) был сконструирован новый наносенсор на основе проводящих полимерных пленок, который может улавливать газообразные химические соединения (рис. 3.23). Их работа была описана в выпуске журнала Американского химического общества от 6 апреля 2005 г. Благодаря нанопорам, расположенным на полимерной пленке, сенсор детектирует очень малые концентрации газообразных химических соединений.

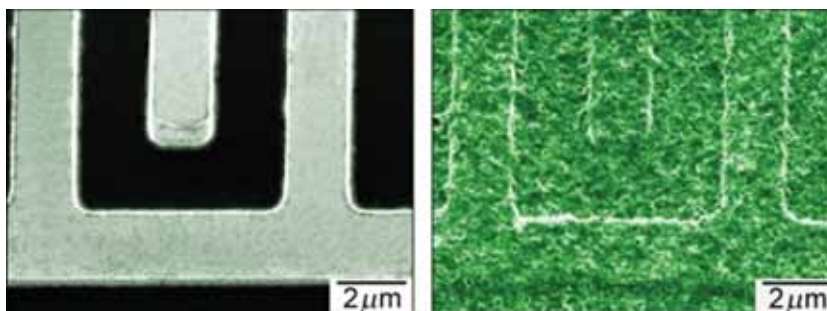


Рис. 3.23. На микрофотографиях, полученных со сканирующего электронного микроскопа (СТМ), видны основные элементы сенсора: микронагревательный элемент (слева) и расположение на сенсоре губчатого полианилинового покрытия, захватывающего молекулы газов (справа)

Устройство также можно легко изготовить с помощью уже существующих технологий производства полимерных пленок. Но в первую очередь создание газового наносенсора обязано электропроводящим полимерам. Они обладают электрическими и оптическими свойствами, близкими к свойствам металлов и полупроводников. Но в отличие от металлов, их легче синтезировать, они дешевле и, что самое интересное, могут изгибаться. Благодаря этим уникальным свойствам электропроводные гибкие полимеры сегодня объект пристального внимания со стороны мировой микроэлектронной индустрии.

Полианилин, например, один из представителей класса электропроводящих полимеров. Он может использоваться во многих электронных интегральных схемах. Однако его трудно обрабатывать, так как он плохо растворяется в большинстве традиционных растворителей. Исследо-

¹ New gas sensors patterned with conducting polymer (http://www.eurekalert.org/pub_releases/2005-04/nios-ngs041205.php).



ватели из NIST решили эту проблему, поместив наночастицы полианилина в слабый раствор растворителя.

«Прелесть этого метода в том, — говорит Гуофенг Ли, один из ученых, работающих над газовым наносенсором, — что цепи полимера анилина несут естественный положительный заряд. Как только мы синтезировали наночастицы, они перестали слипаться друг с другом, так как несут одинаковый заряд и силы электростатики действуют на них отталкивающе. Более того, этими положительно заряженными наночастицами можно манипулировать, применив к раствору электрическое поле определенного шаблона, для того чтобы получить структуру необходимой конфигурации».

В течение процесса синтеза с помощью метода, предложенного исследователями из NIST, был получен наногубчатый полианилин, который способен эффективно захватывать молекулы газов. Далее исследователи продемонстрировали, как можно с помощью этого полимера детектировать спирт или водяной пар. Для того чтобы перенастроить сенсор на другие газы (токсичные, например), исследователям необходимо провести ряд дополнительных изысканий.

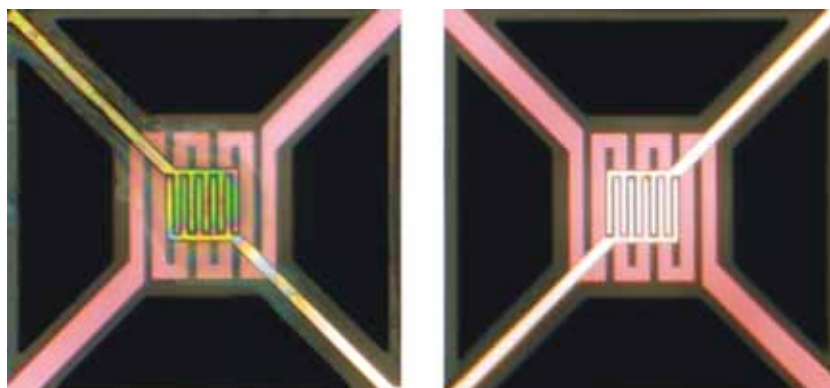


Рис. 3.24. Фотографии двух наносенсоров, изготовленных исследователями из NIST. Каждое устройство 100 мкм в длину. Слева микронагреватель покрыт проводящим полимером — полианилином (зеленого цвета), а справа — такой же нагреватель без покрытия

Ученые из NIST запатентовали полученный наносенсор (рис. 3.24) и принцип его производства. Принцип действия наносенсора довольно прост: микронагреватель постепенно нагревает нанопористый полианилин, сопротивление которого зависит от того типа молекул, которые в нем находятся. По изменениям электрического тока, протекающего через наносенсор, ученые узнают, на какой газ он среагировал.



Газовая нанотурбина¹

Как мы уже говорили, наноактюатор – один из основных компонентов наномашин, наноманипуляторов и нанокomпьютеров. Поэтому многие исследовательские команды стараются как можно больше приблизиться к тому, чтобы рассчитать и создать миниатюрные моторы. Ученые из Корейского университета предлагают использовать в качестве основы наноактюатора газовую турбину.

Ученый Чанг-Анг разработал газовую нанотурбину на основе вложенных друг в друга нанотрубок (рис. 3.25). Как он полагает, это будет простым и надежным решением для приведения в движение наномашин.

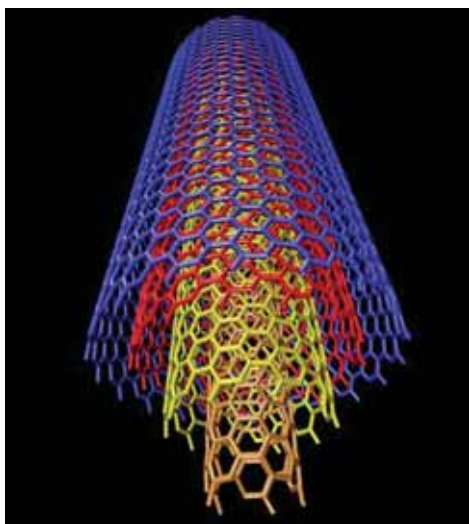


Рис. 3.25. Структура многослойной нанотрубки

Производство нанотрубок сегодня не является проблемой. А то, что нанотрубки имеют малый диаметр (от 1 нм и более), позволяет существенно уменьшить размеры актюатора. Напомним, что диаметр самого маленького наноактюатора, созданного человеком, составляет около 500 нм (Алекс Зеттл).

Ученые уже давно синтезировали и исследовали многослойные нанотрубки, которые представляют собой несколько нанотрубок, вложенных одна в другую. Чанг-Анг исследовал трение, которое возникает при протекании газа по внешней поверхности нанотрубки и, изучив результаты исследований, пришел к выводу, что силу трения можно использовать в качестве вращающего момента, действующего на нанотрубку.

¹ TRN: Nano gas turbine designed.



Ранее, изучив трение в многослойных нанотрубках, исследователи узнали, что при вращении одной нанотрубки внутри другой сила трения ничтожно мала. Используя разницу в силе трения, можно было бы заставить вращаться внешнюю нанотрубку, воздействуя на нее газом или жидкостью. Скорость вращения ротора можно было бы изменять, управляя количеством газа, протекающего по поверхности нанотрубки.

Проведенные ранее исследования показали, что если внутренний слой многослойной нанотрубки повернуть, то она возвращается в прежнее положение благодаря силам электростатики. Но при этом она движется маятникообразно, делая миллион колебаний в секунду. Исследователи решили использовать это свойство нанотрубки для того, чтобы сделать насос, который сможет нагнетать в другую нанотрубку-турбину газ или жидкость. А газ, в свою очередь, протекая по внешней поверхности нанотрубки, заставляет ее вращаться. А так как частотой осцил-

лирования нанотрубки-насоса можно управлять (например, подавая напряжение на нанотрубку), то, соответственно, можно заставить работать турбину с различной скоростью (рис. 3.26). Так исследователи хотят создать и насос, и актуатор.

Как утверждает Чанг-Анг, нанонасос-турбину можно будет создать в течение следующих семи лет. О результатах своих исследований ученые сообщили в ноябрьском выпуске журнала *Nanotechnology* 2005 г.

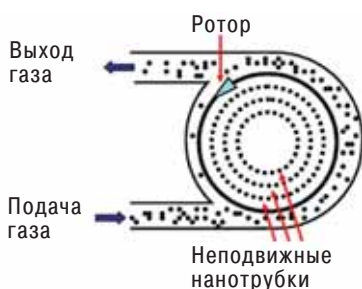


Рис. 3.26. Принцип работы газовой нанотурбины

Продукты нанотехнологий завоевывают мировой рынок¹

Компания NANOIDENT AG, мировой лидер в области органических фотонных сенсоров, представила первый органический полупроводниковый фотонный сенсор высокого разрешения для промышленных применений. Разрешение сенсора составляет 250 dpi при размере 50×50 пикселей. Применение органической пленки в качестве основы сенсора позволило сделать его гибким и тонким. Как говорят эксперты, органический сенсор от NANOIDENT открывает новый класс в области фотонных сенсоров. Основная особенность нового продукта, помимо высокого разрешения, — его низкая стоимость, поэтому наносенсор будет лидировать на мировом рынке (рис. 3.27).

¹ Nanotechnology-Now: NANOIDENT AG realizes the first high-resolution organic photonic sensor.



Рис. 3.27. Работа фотонного сенсора от NANOIDENT

Появление на рынке органического фотонного сенсора, созданного с помощью нанотехнологий, означает, что коммерциализация нанопродуктов успешно началась. Если ранее подобные устройства можно было сделать в единичных экземплярах в лаборатории, то сегодня их производят массово и они конкурентоспособны на мировом рынке. «Рынок фотонных сенсоров возник еще около 40 лет назад, а с появлением органического наносенсора мы предвидим большие маркетинговые изменения, — говорит глава компании NANOIDENT Клаус Шретер. — Это первый в мире гибкий наносенсор, позволяющий детектировать фотоны с высоким разрешением». Как далее заявляет Шретер, новый продукт будет использоваться в системах распознавания отпечатков пальцев, так называемых «умных» карточках и различных биочипах.

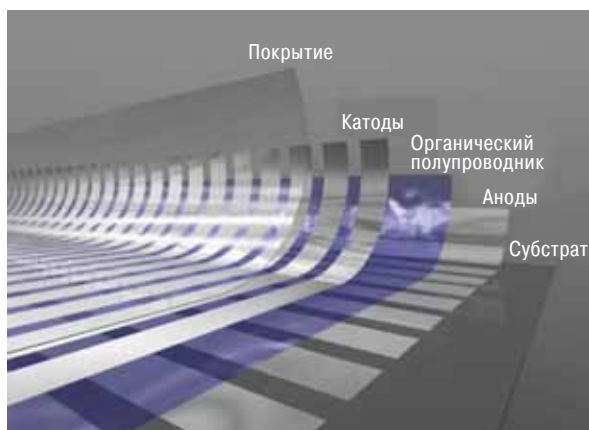


Рис. 3.28. Структура фотонного чипа



Органический сенсор состоит из гибкой PЕТ-пленки, содержащей ультратонкие слои микроструктурированных электродов и фотоактивных полупроводников (рис. 3.28). «Мы смогли разработать технологию, позволяющую наносить полупроводниковые слои на пленку подобно тому, как происходит печать изображения на струйном принтере. Грубо говоря, мы просто печатаем на пленке несколько слоев наносенсоров специальным составом, содержащим жидкие полупроводники. Это позволяет существенно снизить производственные затраты и, как следствие, себестоимость продукта и его конечную цену», — говорит Шретер.

Многие мировые эксперты-маркетологи уверены в том, что появление этого нанопродукта ознаменовало начало коммерциализации нанотехнологий и продуктов с их использованием. «Чтобы производить это устройство в больших количествах, нам потребовалось провести не один год научно-технических исследований в области органической фотоники, нанофизики, физики покрытий и органических полупроводников. Но зато теперь можно с уверенностью сказать, что годы разработок окупятся», — говорит Шретер. Компания NANOIDENT также сотрудничает с несколькими научно-исследовательскими организациями, благодаря которым были проведены исследования в области органических полупроводников, необходимые для производства сенсора.

Дисплеи нового поколения на мировом рынке¹

Похоже, жидкокристаллические дисплеи доживают свои последние дни. В ближайшем будущем их заменит так называемая «электронная бумага» с гораздо большей контрастностью и быстродействием. Отчасти принцип действия новой технологии базируется на жидких кристаллах, но имеет ряд нововведений и усовершенствований.

Традиционные жидкокристаллические дисплеи не могут завоевать себе массовой популярности среди широкого пользователя по трем причинам:

- из-за низкого времени отклика матрицы;
- из-за малого угла обзора;
- из-за высокой стоимости.

Как правило, для работы с мультимедиапрограммами, просмотра видео и компьютерных игр пользователи выбирают обычные электронно-лучевые мониторы, поскольку угол обзора у них достаточно большой для того, чтобы смотреть фильм или играть в компании друзей. Жидкокристаллические же мониторы обычно используют в бизнес-решениях, где нужно сохранить полезную площадь рабочего места.

¹ Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 1.



Не секрет, что последние несколько лет производители ЖК-панелей пытаются улучшить их параметры, и постепенно мониторы становятся более качественными и снижаются в цене. Но скорее всего, при использовании традиционных ЖК-технологий на рынке не появятся дисплеи с высокой контрастностью и быстродействием. Улучшение же традиционной ЖК-технологии с помощью нанотехнологий позволит выдвинуть на рынок новое поколение дисплеев, которые могут вытеснить электронно-лучевые и даже плазменные.

Прототипы дисплеев, созданных с использованием нанотехнологий, уже есть. Более того, существуют продукты, уже продающиеся на мировом рынке. Расскажем подробнее об этих новинках.

Один из флагманов в области «нестандартных» ЖК-дисплеев — ирландская компания NanoChromics. Она представляет на рынке продукт The NanoChromics Display (NCD), впервые показанный на конференции «DEMO 2005».

Второе название нового дисплея — «дисплей чернила-на-бумаге» (ink-on-paper display). Назван он так потому, что изображение, сформированное на дисплее, похоже на бумажный рисунок, выполненный цветными чернилами. Изображение настолько контрастно, что угол обзора дисплея составляет 180° , это соответствует максимальному значению для любых дисплеев вообще. Скорость отклика матрицы в них достаточно высока. Продающиеся сегодня дисплеи могут обеспечивать частоту в 60 кадров в секунду.

Изображение остается на дисплее даже тогда, когда питание отключается. Этот эффект достигается благодаря переключению пигментных слоев, которые формируют пиксели. Так как изображение формирует пигмент, то дисплей не нуждается в дополнительной подсветке, что существенно снижает его энергопотребление. Представители компании считают, что при одинаковых размерах NCD будет потреблять всего 10% той энергии, которую потребляет LCD. Тот факт, что дисплей не потребляет энергии для формирования картинки длительное время (энергия нужна только для переключения слоев пигмента, как мы говорили выше), позволит создать на базе NCD «жидкокристаллические обои» или другие декоративные элементы.

Рассмотрим принцип действия дисплея NanoChromics (рис. 3.29). Дисплей состоит из нескольких слоев. Изображение формируют два «рабочих» слоя: внешний отражающий слой, состоящий из наночастиц диоксида титана (это вещество применяется в бумажной промышленности для придания бумаге белого цвета), и электрохромный слой с красящим пигментом. Как только на слои подается разность потенциалов, электрохромный слой перемещается ближе к отражающему и пользователь видит четкую картинку с высокой контрастностью. А если изменить полярность напряжения, то слой «переключится» в такое состояние, при котором будет виден только отражающий пигмент диоксида титана.

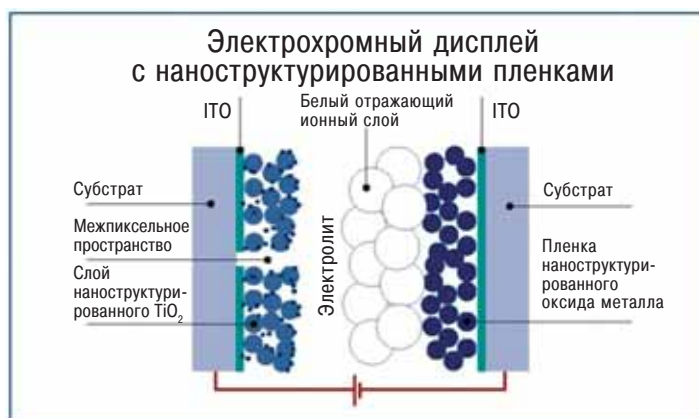


Рис. 3.29. Принцип действия дисплея NCD

Так достигается формирование картинки. Благодаря высокой мобильности пигментного слоя на основе электрохромных наночастиц достигается высокая скорость переключения, что, в свою очередь, позволяет добиться высокой частоты смены кадров — до 60 кадров в секунду. Все дисплеи компании пока монохромны, но представители NanoChromics утверждают, что возможно дальнейшее развитие этой технологии для создания цветных дисплеев — необходимо будет добавить к одному пигментному слою еще два слоя других цветов. Пока что все картинки на NCD-дисплеях темно-синие или зеленые.

Новые мониторы также неприхотливы к окружающей температуре. Настольные часы на основе NCD работают в температурном диапазоне от -35 до $+80^{\circ}\text{C}$.

Специалисты компании заверяют, что традиционную линию по производству жидкокристаллических мониторов можно переоборудовать под NCD, затратив всего 20 000 долл. При этом стоимость новых нанохромных дисплеев будет ниже.

Пока компания продает отдельные дисплеи, настольные часы и приборы для медицинского пользования. В ближайшей перспективе — производство электронных книг и карманных компьютеров.

Другую, не менее революционную технологию предложила компания Bridgestone, которая, как это ни поразительно звучит, производит автомобильные покрышки.

По словам представителей Bridgestone, материал, из которого выполнен дисплей, очень тонок, обеспечивает большой угол обзора и в то же время потребляет меньше энергии.

На это изобретение шинопроизводителя навели проводимые им исследования в области электротехнических материалов — стремительно развивающейся, благодаря мобильным технологиям, отрасли.



Как сообщают представители компании, время отклика нового жидкокристаллического дисплея в 100 раз меньше, чем у обычных LCD-мониторов. Новое устройство назвали Quick Response Liquid Powder Display (QRLPD). Инновация, позволяющая настолько увеличить скорость отклика, состоит в применении тех же наночастиц.

Специалисты из Bridgestone использовали в этом мониторе новый тип материалов – наноструктурированные порошки, которые при определенных условиях ведут себя как жидкости. Поэтому новый дисплей называется «Liquid Powder» (т.е. «жидкопорошковый»). Этот наноматериал реагирует на электрическое поле очень быстро благодаря своим электрическим свойствам. За счет этого достигается высокая скорость отклика. А то, что наноматериал проявляет свойства жидкости, позволяет делать гибкую «электронную бумагу» (рис. 3.30) на основе новой технологии. Также QRLPD отражает более 45% падающего на него света. Это значит, что «электронная бумага» будет похожа на обычную ярко-белую.



Рис. 3.30. Quick Response Liquid Powder Display

есть в продаже, можно смело говорить о том, что дисплеи на основе нанотехнологий вышли на рынок. И 2005 г. стал «годом становления» для этих новинок.

Как и его аналог от Nano-Chromics, дисплей QRLPD также хранит изображение при отключении питания. По словам команды из Bridgestone, управление новыми панелями не требует стандартных TFT-матриц (TFT – «thin-film transistors» – пленка из транзисторов, управляющих отображением информации на дисплее), которые применяются в обычных LCD-мониторах.

Если дисплей от Bridgestone пока массово не производится, то компания Nano-Chromics уже продает свои дисплеи, часы и медицинские приборы. Так что нанодисплей уже «покинул лабораторию», чего не скажешь о многих современных достижениях нанотехнологий. А судя по тому, что товары на их основе



Первый цветной дисплей на нанотрубках от компании Motorola

97

Первый цветной дисплей на нанотрубках от компании Motorola¹

Дисплеи на нанотрубках и OLED-технологиях достаточно близко подошли к выходу на мировой рынок. И недавно это еще раз подтвердила компания Motorola.

На этот раз был создан плоский цветной дисплей на основе нанотрубок. Использование нанотрубок позволит создать плоско-панельные дисплеи, имеющие длительный срок службы, обеспечивающие высокое качество и при этом стоящие значительно дешевле, чем те, которые мы имеем сегодня (плазменные и жидкокристаллические).

Продемонстрированный прототип оптимизирован для требований телевидения высокой четкости. Как ни странно, но это работоспособный дисплей, а не мини-экран для мобильного телефона. Он представляет собой 5-дюймовый фрагмент 42-дюймовой панели разрешением 1280×720 пикселей. Толщина панели – около 3 мм. Для отображения цвета использованы привычные по телевизионным кинескопам люминофоры, что обеспечивает яркие и естественные цвета. По скорости отклика, углу обзора, диапазону рабочих температур прототип не уступает дисплеям на базе электронно-лучевых трубок. И это дает преимущество дисплеям на нанотрубках перед обычными плазменными и жидкокристаллическими.

Суть технологии сводится к «выращиванию» нанотрубок непосредственно на стеклянной подложке, связывая их с нею с помощью органической пасты, которая позволяет достичь более мощной эмиссии электронов из нанотрубок.

Как вы знаете, нанотрубки – дорогой товар. Сегодня грамм чистых нанотрубок стоит около 60 долл. Как утверждают специалисты, в будущем нанотрубки могут серьезно подешеветь, что положительно скажется на цене будущих NED-дисплеев. Так, маркетологи из Motorola назвали свой продукт – Nano Emissive Display (NED), т.е. дисплей с эмиссией электронов из нанотрубок.

Продемонстрированный в рамках презентации образец NED-дисплея имеет диагональ 5 дюймов и представляет собой фрагмент 42-дюймовой HDTV-панели с разрешением 1280×720 пикселей и соотношением сторон 16:9. Толщина прототипа составляет всего 3,3 мм.

«Наша компания имеет 15-летний опыт работы с нанотрубками, и у нас есть около 160 патентов, касающихся только NED-технологии. Кроме того, у нас есть работоспособные образцы. Вот почему мы надеемся на скорое появление на рынке дисплеев нового претендента в лидеры» – так сказал Джим О'Коннор, вице-президент компании.

¹ Motorola. Motorola Labs Debuts First Ever Nano Emissive Flat Screen Display Prototype (http://www.motorola.com/mediacenter/news/detail/0,,5484_5474_23,00.html).



Предполагается, что применение новой технологии производства плоскпанельных дисплеев позволит увеличить их срок службы и одновременно снизить себестоимость. По оценкам аналитиков фирмы DisplaySearch, изготовление устройства с диагональю 40 дюймов по методике Nano Emissive Display обойдется производителям примерно в 400 долл. США. Впрочем, о сроках практического использования предложенной технологии специалисты Motorola пока умалчивают. Ожидалось, что более подробная информация о методике NED будет обнародована в 22–27 мая 2005 г. на выставке Society for Information Display International Symposium, Seminar and Exhibition в Бостоне.

Молекулярные машины вращают ДНК вдоль оси¹

Нидерландские исследователи детально изучили механизм высвобождения вращающего момента, присутствующего в молекуле ДНК на молекулярном уровне, который активируется энзимом – топоизомеразой IV. В качестве иллюстрации своей работы учеными была составлена математическая модель взаимодействия молекулы ДНК с энзимом и на ее основе выполнена компьютерная анимация, показывающая вращение молекулы вокруг своей оси.

Результаты своей работы ученые опубликовали в выпуске журнала Nature от 31 марта 2005 г. Там же был представлен ряд рисунков из компьютерной анимации, поясняющей, как работает энзим (рис. 3.31).



Рис. 3.31. Энзим разрезает ДНК, освобождая торсионный механический момент, который вращает молекулу (кадр из анимации)

¹ NWO. Doing a spin with DNA (http://www.nwo.nl/nwohome.nsf/pages/NWOP_6AXJ7K_Eng).



Как известно, молекула ДНК состоит из двух цепей, связанных между собой базами-основаниями. И эти цепи свернуты в двойную спираль. Образно говоря, молекула представляет собой веревочную лестницу, скрученную по оси, перпендикулярной ступеням. Как выяснили исследователи, в таком положении ДНК аккумулирует механический момент. Похожие системы, созданные человеком, называются торсионными. Они широко используются в машинах и механизмах, где нужно аккумулировать механический момент.

В процессе деления клетки энзимы разрезают ДНК таким образом, чтобы освободившиеся последовательности можно было скопировать. Это необходимо при делении клетки. Энзимы представляют собой молекулярные машины с множеством функций, созданные природой. Однако для функционирования клетки нужно, чтобы молекула осталась неповрежденной. Поэтому существует сложный механизм разворачивания цепи ДНК и последующего ее сворачивания. Одну из функций, необходимую для разворачивания цепей молекулы, обеспечивает энергия, сохраненная в торсионной системе ДНК.

Торсионные силы зачастую контролируют весь процесс разворачивания и сворачивания молекулы. Однако отдельные энзимы, например топоизомераза IV, могут уменьшать торсионные силы.

Смысл работы ученых заключался в том, чтобы детально исследовать механику взаимодействия отдельной молекулы ДНК с молекулой энзима. В ходе экспериментов исследователи установили, что энзим топоизомераза IV разрезает одну цепь молекулы ДНК. При этом освобождается торсионный механический момент, и молекула вращается в активном центре энзима до тех пор, пока разорванная цепь не соединится вновь.

С помощью сверхточных измерительных приборов ученые смогли измерить коэффициент трения цепи ДНК, активный центр энзима и другие механические параметры вращения. И конечно, они узнали, сколько оборотов вокруг неповрежденной цепи делает молекула, прежде чем перерезанная цепь соединится снова.

Эти исследования позволят разработать новые методы использования энзимов в качестве молекулярных машин для приведения в движение наносистем на основе молекул ДНК, а также помогут ученым понять молекулярные механизмы деления клетки.

Нановелосипед покажет себя на Tour de France¹

В этом году участники велогонки Tour de France увидят первый велосипед с рамой из композита, содержащего нанотрубки. На нем выступят члены команды Phonak Team. Изготовлен велосипед швейцарской ком-

¹ Nanotechweb: Nanotube bike enters Tour de France.



100 Глава 3. Нанодатчики и наноустройства

панией BMC, которая утверждает, что спортивная машина при массе менее 1 кг характеризуется высокой прочностью.

Рама велосипеда выполнена из композитного материала на основе нанотрубок, разработанного специалистами из компании Easton, которая состоит в тесном сотрудничестве с компанией Zuvex. Специальный композит формирует из нанотрубок пространственную сетку-матрицу, благодаря которой достигается столь большая жесткость при небольшой массе материала.

Вклад компании Zuvex заключается в том, что она разработала состав, позволяющий модифицировать поверхность углеродных нанотрубок таким образом, чтобы они легко входили в состав композита-наполнителя, образующего основу велосипедной рамы.

Компания BMC первой сделала велосипед с нанорамой на основе углеродных нанотрубок. Рама после производства требует дальнейшей обработки. Так как это может повредить волокна нанотрубок, она была изготовлена по прецизионной технологии. После выпуска первого велосипеда компания BMC заявила, что она собирается впредь вкладывать деньги в нанотехнологии и композитные материалы на основе нанотрубок. Так что, скорее всего, гоночный велосипед откроет новую линию продуктов, доступных и обычным потребителям.