«Алмаз ТМ-001» новейшая разработка НИИ Точного Машиностроения
Многофункциональная установка для выращивания углеродных нанотрубок и алмазных пленок

Многофункциональный PECVD комплекс предоставляет Центрам-разработчикам новейших наноприборов уникальные возможности для создания технологических процессов:

→ Выращивание углеродных нанотрубок и нановолокон, в том числе ориентированных, на каталитических слоях (Co, Fe, Ni и др.)
→ Осаждение алмазных пленок (включая легированные) на кремниевые, сапфировые, поликоровые и другие подложки, с диаметром до 100 мм.

Комплекс автоматизирован, обеспечивает прецизионное регулирование и построен по модульному принципу, что позволяет Заказчику выбрать нужную ему конфигурацию

Комплекс содержит:

→ Реактор металлический водоохлаждаемый с кварцевой футеровкой и шлюзовой загрузкой.
→ Графитовый подложкодержатель с нагревом до 950°C.
→ Вакуумную систему с форвакуумным и турбомолекулярным насосами.
→ 7-ми канальную газовую систему.
→ СВЧ, ВЧ генераторы и источник постоянного смещения
→ 2-х контурную систему водоохлаждения и систему воздушного охлаждения.
→ 2-х уровневую компьютерную систему управления.

ОАО НИИ Точного Машиностроения
ОАО НИИТМ, Россия, 124460 Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект 10
Телефон +7 (495) 229 7501, +7 (495) 535 1449
Факс +7 (495) 535 6386
Web: www.niitm.ru

МИР материалов и технологий

Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника

Мировые достижения за 2005 год

Сборник под редакцией
д.т.н., профессора
П.П. Мальцева

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2006

Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника
Мировые достижения за 2005 год
Сборник под редакцией д.т.н., профессора П.П. Мальцева
Москва:
Техносфера, 2006. – 152 с., ISBN 5-94836-085-7

Приведены мировые новости за 2005 год, сгруппированные по разделам и охватывающие наноматериалы, наноэлектронику, нанодатчики и наноустройства, диагностику наноструктур и наноматериалов, нанобиотехнологию и применение нанотехнологий в медицине. В книге с цветными иллюстрациями приведены примеры реализации и применения в области технологии формирования наноструктур, методов исследования наноматериалов, метрологическое обеспечение и основы технологии наносистемной техники.

Сборник представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и студентов, специализирующихся в области нанотехнологии, наноматериалов, наноэлектроники, микро- и наносистемной техники.

© 2006, П.П. Мальцев, составление
© 2006, ЗАО "РИЦ "Техносфера",
оригинал-макет, оформление

ISBN 5-94836-085-7

ФГУП "НИИ физических проблем им. Ф. В. Лукина"

КАНТИЛЕВЕРЫ:
чувствительные элементы для сканирующей зондовой микроскопии

– 5 лет производства и поставок кантилеверов
– Объём поставок 60-100 тыс. шт. в год
– Качество на мировом уровне
– Номенклатура – более 50 наименований
– Выполнение специальных заказов
– Разработка новых типов

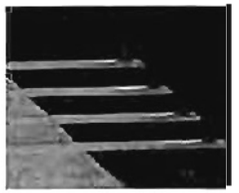
Типичный вид иглы кантилевера

Кончик иглы кантилевера. Радиус скругления острия <10нм (на пределе разрешения растрового электронного микроскопа)

Игла кантилевера на краю консоли

Игла, консоль и кристалл

Кантилеверы с треугольной консолью


Четырёхконсольный кантилевер

Основные характеристики кантилеверов

Кристалл: длина × ширина 3,6 x 1,6 ± 0,1 мм; толщина 350 ÷ 450 мкм
Консоль: длина мкм 100 ± 5, 130, 250, 350; толщина мкм 1; 2 ширина мкм 35 ± 3; резонансная частота кГц 10; 20; 150; 250
Игла: угол при вершине °, ≤ 22; высота, мкм ≥ 7; радиус скругления острия: категория "Super", нм ≤ 10; категория "Standard", нм ≤ 25

Типы и варианты

– Контактные
– Бесконтактные
– "Super"
– "Standard"
– Двухконсольные
– Одноконсольные длинные
– Одноконсольные короткие
– Прямоугольная консоль
– Треугольная консоль
– Без покрытия
– С покрытием: Pt, W_2C, TiN, Au, CoNi, Co-Cr, FeNi
– РЭМ изображения иглы

Подробности (прайс-листы, параметры, контакты):
124460, Москва, Зеленоград пр. 4806, д. 6
www.niifp.ru shokin@niifp.ru 531-02-76

Содержание

От редактора 10

Глава 1. Наноматериалы 13
- Наноматериал графен — пленка толщиной в атом 13
- Прозрачные пленки из нанотрубок 14
- Пленки из наночастиц формируют «резиновые» нанотрубки 15
- Электропроводящие нанотрубки большой длины 16
- Новый инструмент визуализации наномира: яркие квантовые точки 17
- Ученые из Брукхейвена создали уникальную наноструктуру 19
- Серебряные цветы и карта Новой Зеландии в наномире 20
- Что будет, если надавить на нанотрубку? 24
- Светоизлучающие нанотрубки в телевизорах и дисплеях 26
- Кисть из нанотрубок 27
- Нанотрубки для топливных элементов 29
- Наноструктуры по шаблону 31
- Батарейку от Toshiba можно зарядить за 60 секунд 32
- Батарейка на основе «нанотравы» от mPhase Technologies 33
- Создана прозрачная наноткань с прочностью стали 34
- Нанопокрытие NanoMATRIX для одежды 36
- Нанотехнологии выходят на корт 37
- Наноматериалы частично поражают легкие 39

Глава 2. Наноэлектроника 41
- Нанотрубка в роли транзистора 41
- Компания Infineon создала самый маленький в мире транзистор на нанотрубке 43
- IBM утроит производительность транзисторов 44
- Транзистор с плавником от Infineon уменьшил flash-память 45
- Сверхконденсаторы из углеродных нанотрубок 46
- Фотонные транзисторы в кремниевом исполнении 47
- HP провозглашает конец кремниевой эры 50
- Квантовый выключатель — основа будущей нанологики 53
- Способ массового производства электронных схем на основе нанотрубок 55
- Штампуя наносистемы 56
- Компания TSMC объявила о промышленном выпуске чипов по 65-нанометровому техпроцессу к концу 2005 г. 58
- HP избавит мир от транзисторов 58

Глава 3. Нанодатчики и наноустройства 60
- Проект наномеханического вентиля 60
- Наноэлектромеханический одноэлектронный транзистор с «механической рукой» 62

Активатор

Новосибирск, Софийская 18, оф 108,
630056 Новосибирск 56, а/я 141
Факс: 8-(383)-345-15-30 (доп. 41)
Тел: 8 901 450 6304
e-mail: belyaev@activator.ru
web: http://www.activator.ru

Российские лабораторные мельницы “Активатор” для сверхтонкого измельчения, научных и технологических исследований!

–Мощное воздействие ускоренных (до 1500 м/с^2) шаров и интенсивное водяное охлаждение обеспечивают сверхтонкий помол, смешение, **механохимический синтез и активацию.**

–Ударный, сдвиговый и вихревой режимы активации позволяют воздействовать на порошок **различными способами**. Гидродинамическая активация жидкостей (акустическая кавитация) приводит к образованию эмульсий и суспензий наночастиц.

–Компьютерное управление режимами и ускорением шаров, контроль температуры и мощности, дают **точную воспроизводимость** результатов измельчения, активации и синтеза.

– Сверхтонкое измельчение - оптимальный способ получения **нано частиц!**

Наномеханическая память вскоре заменит традиционную магнитную 64
Механическая память на основе НЭМС 65
«Многоножка» стартует с 10 Гб 68
Память объемом в 100 Гбайт благодаря нанотехнологиям 72
Магнитная flash-память на основе углеродных нанотрубок 73
Открытые микрожидкостные и наножидкостные системы 75
Ученые построили первый наножидкостный транзистор для химических компьютеров 77
Сверхточный детектор массы и силы на основе нанотрубки 80
Датчик наноперемещений 82
НЭМС для взвешивания ДНК 83
Вращающийся нанопропеллер 84
Новый подход в наномоторах – использование силы поверхностного натяжения 86
Газовый наносенсор на основе проводящего полимера 88
Газовая нанотурбина 90
Продукты нанотехнологий завоевывают мировой рынок 91
Дисплеи нового поколения на мировом рынке 93
Первый цветной дисплей на нанотрубках от компании Motorola 97
Молекулярные машины вращают ДНК вдоль оси 98
Нановелосипед покажет себя на Tour de France 99

Глава 4. Диагностика наноструктур и наноматериалов 101
Новые суперлинзы – база будущей оптоэлектроники 101
Оптическая микроскопия для манипулирования нанотрубками 105
Как «Многоножка» залезла в микроскоп, или Оптическая микроскопия в нанорежиме 105
Лазерная идентификация материалов 107
Математическая модель квантовых точек открывает их новые свойства 108
Компания НТ-МДТ вывела на рынок новые DLC-иглы 111
«Невидимое сделать видимым» 112

Глава 5. Нанобиотехнологии и применение нанотехнологий в медицине 113
Живое наноожерелье 113
ДНК-нанопроволока для будущей микроэлектроники 115
Микроорганизмы синтезируют проводящие нанонити 116
Наноэлектронный прибор на основе одной органической молекулы 118
Хламидомонада в качестве «грузовика» 119

Scientific Production Association
«Nanometric Metal Powders High Technology»
«NMPHT»
SPA «NMPHT»

НАНОМЕТАЛЛЫ –
НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ПРИМЕНЕНИЕ:
1. Нанометаллы размерами 2-30нм.:
- новые селективные катализаторы,
- присадки в полимеры и краски для получения изделий с новыми экстремальными характеристиками,
- лигатурные добавки,
- медицина, биология.
2. Дисперсные порошки размерами 30-100нм.:
- получение новых сплавов и интерметаллов,
- полимеры со второй дисперсной фазой,
- толстопленочные покрытия и проводящие пасты.
3. Порошки размерами 1-20мкм.:
- получение высокоточных изделий в порошковой металлургии,
- качественная газотермическая металлизация,
- получение композиционных материалов.

4, Miasnitskaia ul., 125424, Moscow, Russia
Tel.: +7 (495) 228-78-18, +7 (916) 455-30-30, +7 (926) 511-33-84
E-mail: nano-spa@mail.ru

Химики создали «крабовые клешни», захватывающие атомы мышьяка 120
Наноустройства ловят вирусы 122
«Живые» роботы двигаются с помощью мышц 124
ДНК-наномашина производит полимер 126
Приручение таинственных биологических наноконтейнеров 127
Дендромерные ДНК-наночастицы помогут бороться с раком и другими заболеваниями 130
Углеродные нанотрубки в мозговых имплантах 132
«Умные» нанотрубки в доставке лекарств 134
Золотые наночастицы могут упростить диагностику раковых опухолей 137
Новый тип РНК-нанокапсул излечит от рака 138
Наночастицы и дендромеры помогают космонавтам 141
FDA берет нано под учет 145
«Печатный станок» и экспресс-анализ ДНК 146
Мозг на нанопроводниках 148

НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ

НПФ «Элан-Практик» разрабатывает технологии и изготавливает вакуумные установки для нанесения нанокомпозитных PVD- покрытий
Основные преимущества нанокомпозитных покрытий

- экстраординарные механические свойства (микротвердость – до 80 ГПа, коэффициент стойкости к пластической деформации – до 2,0), высокая термостойкость до 1200°С
- плотная беспористая структура при полном отсутствии включений микрокапельной фазы свойственной вакуумно-дуговым покрытиям
- возможность получения сверхтвердых покрытий при низких температурах процесса (до 160°С) для деталей из сталей с низкой температурой отпуска
- гладкая поверхность покрытия, не уменьшающая класс чистоты исходной поверхности, позволяющая исключить повторную полировку изделия после нанесения покрытия
- широкие возможности по нанесению многослойных комбинированных защитных/функциональных твердых покрытий в одном цикле на изделия, изготовленные из коррозирующих материалов, без гальванического подслоя никеля и твердого хрома

НПФ «Элан-Практик» г. Дзержинск, ул. Бутлерова,51 тел/факс 8313-27-40-45,
praktik@sinn.ru www.elanpraktik.ru

Московские ученые – оборонному комплексу России

- Поглотители и экраны электромагнитных волн на основе наноструктурного ферромагнитного микропровода
- Дисперсно-упрочненные функционально-градиентные материалы для защиты от ударно-пулевого воздействия
- Сверхтвердые наноструктурные покрытия
- Защита лопаток газотурбинного двигателя летательных аппаратов

Новейшие разработки для электронной техники, информационных технологий, приборостроения

Канал обмена информацией "Заказчик-Разработчик"

ФГУП "ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга" post@cnirti.ru
ИАЦ "Наноматериалы и Нанотехнологии" МИСиС nano@misis.ru
ФГУП "ЦКБ РМ" ckbrm@nm.ru

От редактора

Новейшие нанотехнологии наряду с компьютерно-информационными технологиями и биотехнологиями являются фундаментом научно-технической революции в XXI в., сравнимым и даже превосходящим по своим масштабам с преобразованиями в технике и обществе, вызванными крупнейшими научными открытиями XX в.

В развитых странах осознание ключевой роли, которую уже в недалеком будущем будут играть результаты работ по нанотехнологиям, привело к разработке широкомасштабных программ по их развитию на основе государственной поддержки.

Так, в 2000 г. в США принята приоритетная долгосрочная комплексная программа, названная Национальной нанотехнологической инициативой и рассматриваемая как эффективный инструмент, способный обеспечить лидерство США в первой половине текущего столетия. К настоящему времени бюджетное финансирование этой программы увеличилось по сравнению с 2000 г. в 2,5 раза и достигло в 2003 г. 710,9 млн долл., а на четыре года, начиная с 2005 г., планируется выделить еще 3,7 млрд долл. Аналогичные программы приняты Европейским союзом, Японией, Китаем, Бразилией и рядом других стран.

В России работы по созданию нанотехнологий начаты еще 50 лет назад, но слабо финансируются и ведутся только в рамках отраслевых программ. К настоящему времени назрела необходимость формирования программы общефедерального масштаба с учетом признания важной роли нанотехнологий на самом высоком государственном уровне.

Широкомасштабное и скоординированное развертывание на базе существующего задела работ в области нанотехнологий позволит России восстановить и поддерживать паритет с ведущими государствами в науке и технике, ресурсо- и энергосбережении, в создании экологически адаптированных производств, в здравоохранении и производстве продуктов питания, уровне жизни населения, а также обеспечит необходимый уровень обороноспособности и безопасности государства.

Нанотехнологии могут стать мощным инструментом интеграции технологического комплекса России в международный рынок высоких технологий, надежного обеспечения конкурентоспособности отечественной продукции.

Разработка и успешное освоение новых технологических возможностей потребуют координации деятельности на государственном уровне всех участников нанотехнологических проектов, их всестороннего обеспечения (правового, ресурсного, финансово-экономического, кадрового), активной государственной поддержки отечественной продукции на внутреннем и внешнем рынках.

Формирование и реализация активной государственной политики в области нанотехнологий позволят с высокой эффективностью использовать интеллектуальный и научно-технический потенциал страны в интересах развития науки, производства, здравоохранения, экологии, образования и обеспечения национальной безопасности России.

В Концепции развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий на период до 2010 года, одобренной в основном Правительством Российской Федерации (18 ноября 2004 г.), используются следующие термины:

- *нанотехнология* – совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба;
- *наноматериалы* – материалы, содержащие структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками;
- *наносистемная техника* – полностью или частично созданные на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям;
- *«наноиндустрия»* – вид деятельности по созданию продукции на основе нанотехнологий, наноматериалов и наносистемной техники.

Актуальность и важность указанных работ определили необходимость включения научных направлений, связанных с нанотехнологиями, в Перечень критических технологий Российской Федерации, утвержденный Президентом Российской Федерации.

Для информационного обеспечения в области нанотехнологий издательством «Техносфера» в последние годы читателям представлен ряд книг: «Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века», «Зондовые нанотехнологии в электронике», «Нанотехнологии в электронике», «Нано- и микросистемная техника. От исследования к разработкам», «Нанотехнологии». Подробную информациюоб этих и многих других книгах можно найти на сайте издательства http://www.technosphera.ru.

Регулярное освещение современного состояния, перспектив и тенденции развития нано- и микросистемной техники, рассмотрение вопросов разработки и внедрения в различные области науки, технологии

и производства осуществляется на страницах ежемесячного междисциплинарного теоретического и прикладного научно-технического журнала «Нано- и микросистемная техника» (http://www.microsystems.ru). Журнал включен в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России с апреля 2003 г. С мая 2003 г. журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения информационных технологий и вычислительных систем РАН.

В данной книге приведены мировые новости за 2005 г., сгруппированные по разделам и охватывающие наноматериалы, наноэлектронику, нанодатчики и наноустройства, диагностику наноструктур и наноматериалов, нанобиотехнологию и применение нанотехнологий в медицине. В работе представлены примеры реализации и применения с цветными иллюстрациями в области технологии формирования наноструктур, методов исследования наноматериалов, метрологическое обеспечение и основы технологии наносистемной техники.

Выход этой книги связан с усилиями специалистов из разных коллективов. Прежде всего хотел бы поблагодарить автора раздела «Новости нанотехнологии» журнала «Нано- и микросистемная техника» Ю.Г. Свидиненко и редактора издательства «Новые технологии» Е.В. Григорин-Рябову, а также директора ИПИ РАЕН Л.Ю. Бочарова – за создание электронной версии сообщений для книги и коммерческого директора издательства «Техносфера» О.А. Казанцеву – за создание макета, оперативное издание и распространение книги.

Главный редактор журнала «Нано- и микросистемная техника»
Петр Мальцев

23 мая 2006 года

ГЛАВА 1

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Наноматериал графен – пленка толщиной в атом[1]

Профессор Эндрю Гейм и его коллеги из Университета Манчестера (США) совместно с командой доктора К. Новоселова из Черноголовки (Россия) впервые в мире сумели получить ткань толщиной в один атом. Новый наноматериал представляет собой «развернутую» нанотрубку. Это пленка из атомов углерода, составляющая собой одну молекулу. Журналисты окрестили новый наноматериал «двумерным», так как он толщиной в один атом углерода.

Новый материал назвали графеном (graphene). Профессору Гейму впервые удалось отделить атомарный слой от кристалла графита. При этом отделённые атомы сохранили связь друг с другом, образовав «заплатку» из ткани толщиной в один атом. Исследователи назвали новый материал двумерным фуллереном. Графен стабилен, очень гибок, прочен и проводит электричество (рис. 1.1).

Рис. 1.1. Графеновая пленка – симуляция и микрофотография

При такой толщине поперечник кусочка «ткани» в десять микрон выглядит огромным, но учёные говорят, что нет никаких принципиальных ограничений для создания таких тканей размером в сантиметры.

Исследователи сосредоточились на исследовании электрических свойств нового материала. С помощью графена ученые создали полевой транзистор, который работал при комнатной температуре в обыч-

[1] Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 2.

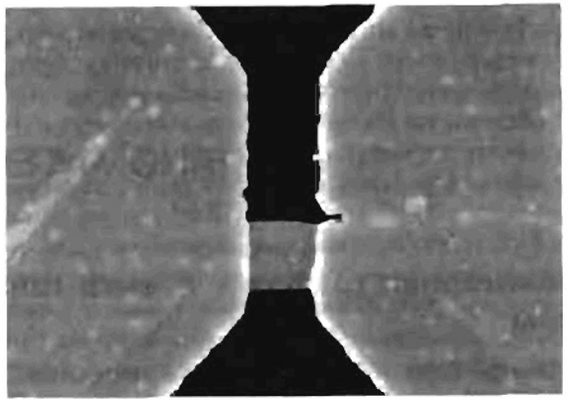


Рис. 1.2. Графеновый транзистор

ных условиях (рис. 1.2). Было также установлено, что электроны в транзисторе могут перемещаться на субмикронные дистанции без рассеивания, что очень важно для применения графена в микроэлектронных устройствах.

Авторы работы прочат графену большое будущее в новых материалах, а также — суперкомпьютерах будущего, где размеры логических схем будут уменьшены в миллионы раз.

Однако на сегодняшний день ученые могут производить графен кусочками размерами 10×10 мкм. Как сказал Гейм, «когда мы научимся синтезировать графеновую пленку размерами в 10×10 дюймов, то только тогда можно будет говорить о том, что новый материал будет успешно применен в микроэлектронике».

Доктор Новоселов добавил, что «сегодня многие исследователи производят нанотрубки все большей длины, поэтому и технологии по производству графена тоже будут развиваться».

Прозрачные пленки из нанотрубок[1]

Для производства гибких компьютерных мониторов нужны такие электронные компоненты, которые были бы и электропроводными, и гибкими, и прозрачными.

Исследователи из Университета Флориды (США) и ученые из Венгерской академии наук разработали технологию производства гибких прозрачных пленок из однослойных нанотрубок. При этом пленка является электропроводной. Прозрачные и гибкие дисплеи на основе нанотрубок могут использоваться в компьютерной технике, инфракрасных камерах, мобильных телефонах, электронной бумаге и т.д.

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

Технология изготовления пленок проста: исследователи погрузили нанотрубки в жидкость, а затем профильтровали раствор на специальном мембранном фильтре, который потом растворили. В итоге получилась пленка, состоящая из электропроводных нанотрубок и гибкого пластикового субстрата.

Как утверждают исследователи, толщину пленки можно изменять с нанометровой точностью. Сейчас же ученые изготовили пленочный диск диаметром 10 см и толщиной всего от 50 до 150 нм.

Пленка толщиной в 50 нм пропускает 70% видимого света и 90% инфракрасного.

Исследователи использовали пленку для того, чтобы сделать «оптический транзистор», который изменяет свою прозрачность в зависимости от присутствия электрического поля. Производственный процесс нанотрубочных нанопленок может быть налажен уже через два года, сообщают ученые. Они описали свою работу в августовском выпуске Science.

Пленки из наночастиц формируют «резиновые» нанотрубки[1]

Исследователь Шахрау Чиеб из Иллинойсского университета создал гибкие кремниевые нанотрубки. Это удалось сделать благодаря синтезу из наночастиц кремния нанопленки, которую затем свернули в трубку. Полученные нанотрубки гибкие, как резина, и могут проводить электричество. Похожие структуры отдаленно напоминают нанотрубки, они больше всего походят на миниатюрные свитки.

«Эти миниатюрные наносвитки могут быть полезны в качестве катализаторов химических реакций. Также наносвитки будут применяться в наноробототехнике, наноэлектронике и микроскопических лазерах», — говорит Чиеб, профессор механики и промышленной инженерии из университета Иллинойса. Для того чтобы сделать нанотрубки-свитки, Чиеб и его коллега профессор физики Адам Смит взяли за основу коллоидную спиртовую суспензию кремниевых наночастиц (каждая наночастица кремния в диаметре составляет около 1 нм). Суспензию поместили в сильное электростатическое поле, после чего наночастицы переместились к положительно заряженной плоскости контейнера, где они находились, образовав тонкую пленку. Когда пленка была высушена, ученые свернули ее в нанотрубку. После измерения образцов ученые установили, что диаметр полученных образцов колеблется от 2 до 5 мкм, а их длина составляла около 100 мкм.

Используя атомно-силовой микроскоп, ученые измерили модуль Юнга (модуль Юнга — это показатель эластичности механического объекта) нанотрубок. Оказалось, что он в 5000 раз меньше модуля Юнга для

[1] EurekAlert (http://www.eurekalert.org/ pub releases/ 2005-06/uoia-tfo061405.php).

кристаллического кремния и всего в 30 раз больше значения эластичности для резины. Грубо говоря, полученные нанотрубки из кремния чуть жестче аналогичных образцов из резины. Поскольку кристаллический кремний совсем не может изгибаться, то достижение ученых из Иллинойса будет использоваться в первую очередь в микроэлектронных устройствах: гибких мониторах и компьютерах, «умной» одежде и электронных продуктах для медицины.

«Мы предполагаем, что нанотрубка, или наносвиток, состоит из кремниевых наночастиц, которые связаны между собой атомами кислорода и образуют трехмерную структуру, похожую на сеть, – говорит Чиеб. – А необычно высокая гибкость наноматериала вызвана тем, что кремниевые наночастицы не связаны кристаллической решеткой, а структурированы совместно с атомами кислорода. Для создания этих наносистем мы использовали новый метод, который может применяться при конструировании дешевых лабораторий-на-чипе».

Ученые предвидят еще несколько областей для применения нанотрубок. «Так как кремниевые наночастицы, из которых состоят наносвитки, характеризуются такими свойствами, как фотолюминесценция, фотостабильность и фотоэмиссия, то вполне вероятно, что на их основе можно сделать фотодиоды и гибкие лазеры, которыми можно будет управлять с помощью электрического поля», – говорит Смит.

Электропроводящие нанотрубки большой длины[1]

Специалисты из университета Калифорнии в Ирвайне создали самые длинные в мире электропроводящие нанотрубки. Длина этих углеродных нанотрубок (фактически – сверхбольших молекул) – 0,4 см. Ранее мы уже сообщали о том, как исследователям удалось создать обычные нанотрубки длиной 4 см, но они плохо проводили электричество.

Новая длина нанотрубок в 10 раз больше прежнего рекорда. Также полученные трубки оказались замечательными проводниками, превосходящими по электрическим свойствам медь. Работали над проектом ученые Питер Берк, Кристофер Рутгерлен и Жен Ю.

Ученые получили рекордные молекулы, нагнетая в специальную печь природный газ. В печь подавали наночастицы железа, с которыми реагировал газ. В итоге удалось синтезировать углеродные нанотрубки, которые осаждались на золотой подложке, представлявшей собой скопление тонких проводников. Присутствие золотой подложки и наночастиц железа позволило создать длинные нанотрубки.

Трубки повисали между отдельными золотыми электродами, к которым потом и подводили ток исследователи. На рисунке можно увидеть

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

матрицу золотых проводников, между которыми росли нанотрубки. Эта работа – важный шаг на пути к созданию новых типов вычислительных устройств и компьютерной памяти.

Исследователи доложили о своем открытии в сентябрьском выпуске журнала Nano Letters.

Новый инструмент визуализации наномира: яркие квантовые точки[1]

Ученые из Корнеллского университета создали новый тип ярких квантовых точек, названных исследователями «Cornell Dot». Эти наноструктуры практически универсальны: их можно использовать в медицине, компьютерной технике, микроэлектронике и биотехнологии.

Новая технология, разработанная исследователями, заключается в том, что квантовые точки обрабатывают, нанося на них специальное кремниевое покрытие, и добавляют специфические метки, которые позволяют придавать «Cornell Dot» различные свойства. Так, например, можно сделать квантовые точки флуоресцентными и использовать их для исследования живых тканей с помощью оптической микроскопии. С помощью наших квантовых точек ученые могут проводить исследования, которые без их использования невозможны», – сказал Ульрих Вайснер, профессор материаловедения из Корнеллского университета.

Квантовые точки – это наночастицы полупроводников (селенид кадмия, например), ведущие себя как отдельные атомы. Они могут поглощать световые волны, перемещая электроны на более высокий энергетический уровень, и выделять свет при переходе электронов на низкоэнергетический уровень. Благодаря этому свойству их и используют в качестве флуоресцентных меток.

С помощью оптического микроскопа мы не можем проследить за перемещением отдельных молекул внутри живой клетки, а с помощью электронного микроскопа отдельные молекулы видны, но для этого клетку приходится умертвить. Однако если снабдить квантовые точки специальными маркерами, то можно прикрепить эти наносистемы к отдельным типам молекул. Для клетки это не представляет вреда, и, что самое главное, результаты видны в оптический микроскоп благодаря флуоресценции маркеров. Поэтому исследователи используют квантовые точки в биологических исследованиях.

Что же нового удалось привнести в уже отлаженную процедуру исследований ученым из Корнелла? Во-первых, обычные квантовые точ-

[1] Cornell University: After quantum dots, now come glowing «Cornell dots», for biological tagging, imaging and optical computing (http://www.news.cornell.edu/stories/May05/CUdots.ws.html).

ки химически активны, а это может негативно повлиять на проводимые с их использованием исследования. Во-вторых, они в 30 раз ярче обычных, что позволило «высвечивать» внутри клетки отдельные молекулы. И в-третьих, они могут присоединяться только к тем молекулам, маркеры которых исследователи «запрограммируют» в квантовой точке. Все эти выгоды ученым принесла новая архитектура построения наночастиц: теперь квантовая точка — это довольно сложное программируемое наноустройство.

«Cornell dots», или «CU dots», — наночастицы, состоящие из ядра диаметром 2,2 нм, помещенного в кремниевую оболочку, содержащую молекулы флуоресцентной краски (рис. 1.3). Диаметр наночастицы целиком — 25 нм. Ученые назвали такое строение квантовой точки архитектурой «ядро-оболочка».

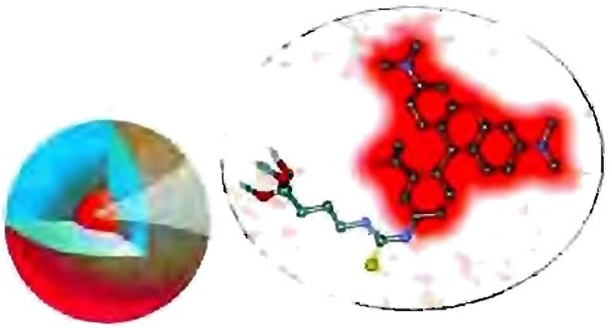


Рис. 1.3. Схематическое представление квантовой точки «Cornell Dot»

Ранее для нанесения на поверхность квантовой точки белкового маркера нужно было использовать дорогостоящий производственный процесс, который состоял в том, что квантовую точку инкапсулировали в полимер. Переход на кремний позволил значительно сократить стоимость диагностики и, как следствие, сделать ее общедоступной для больниц (для ранней диагностики рака, например).

Вайснер говорит, что «кремний — это дешевый инертный материал, который к тому же легко нанести на поверхность квантовой точки. Вместе с тем кремний — материал № 1 в электронике, а это дает уверенность в том, что у квантовых точек, инкапсулированных в нем, большое будущее в микро- и наноэлектронике. Например, благодаря длительной флуоресценции «CU dots» можно сделать новые типы дисплеев или сконструировать из них оптический компьютер». В контрольном исследовании ученые выявили раковые клетки в образце ткани человека, больного лейкемией. Антитела иммуноглобулина Е (IgE), расположенные на поверхности раковых клеток, связывались с наночастицами, а результат было видно в оптический микроскоп.

Оптические свойства новых квантовых точек довольно необычны. Физики задались вопросом: почему эти квантовые точки такие яркие? Ведь суммарная яркость всех частей одной наночастицы меньше всей световой энергии, излучаемой ею. Было предложено несколько объяснений. Одно из них заключается в том, что кремниевая оболочка защищает флуоресцентные метки от контакта со средой.

Вне всякого сомнения, нанотехнологи вскоре получат еще один мощный инструмент визуализации наномира. «Умное» использование квантовых точек только начинается.

Ученые из Брукхейвена создали уникальную наноструктуру[1]

Ученые из Национальной лаборатории Брукхейвен разработали метод производства новых наноструктур. Это ультратонкие «наноленты», нанесенные на поверхность нанотрубок. Эта команда исследователей уже несколько раз становилась первооткрывателем различных наноструктур с необычными свойствами. О своем достижении ученые сообщили в онлайн-выпуске Nano Letters от 4 июня 2005 г. Как оказалось, наноструктуры в виде нанопоясов характеризуются уникальными механическими и электрическими свойствами. «Мы можем синтезировать нанопояса толщиной от 2 до 5 нм. Это довольно важно, так как изменение толщины слоя достигается новым методом производства наноструктур, — говорит один из исследователей Вей-Кванг Хан. — Также мы очень гордимся тем, что создали новый тип наноструктур».

Чтобы вырастить нанопояса, состоящие из германия, на поверхности нанотрубки, ученые использовали новую методику (рис. 1.4). Углеродные нанотрубки (после успешного наращивания нанопояса на углеродных нанотрубках ученые экспериментировали с нанотрубками из

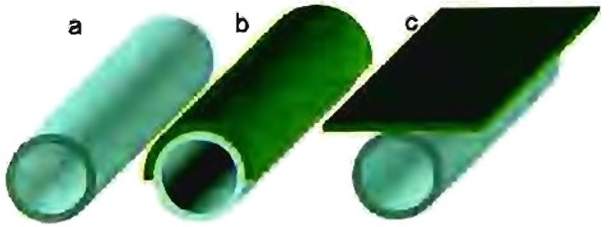


Рис. 1.4. Процесс создания нанопояса. Нанотрубка (а) покрыта атомами германия (б), которые кристаллизуются под воздействием температуры, образуя нанопояс из германия, связанный с нанотрубкой (в)

[1] Brookhaven Center for Functional Nanomaterials: Brookhaven Scientists Create a New Nanostructure.

нитрида бора) были помещены на медную поверхность. Далее верхние части нанотрубок были покрыты аморфным (неупорядоченным) слоем атомов германия. Толщину слоя ученые измеряли специальным устройством, которое позволило контролировать процесс нанесения слоя с точностью до нанометра.

Наконец, нанотрубки нагрели до 750°C внутри микроскопа специального исполнения. По мере того как нанотрубки нагревались, аморфный слой атомов германия кристаллизовался, покрывая нанотрубку однородной наноструктурой, напоминающей пояс. Нанопояс оказался химически соединен с поверхностью нанотрубки, образовав новую гибридную наноструктуру «германиевая оболочка – углеродная нанотрубка».

«Этот метод позволяет наносить покрытие толщиной от 2 до 5 нм, в то время как ранее удавалось синтезировать только 10-нанометровый слой, – говорит Хан. – Наноструктуры, синтезированные с такой точностью, характеризуются новыми физическими свойствами, например, они лучше проводят электричество, чем простые нанотрубки. Это может пригодиться в будущих наноэлектронных устройствах. Также возможно создание гибридной наноэлектроники (подобно полупроводниковым гетероструктурам). Мы уверены, что наше открытие повлияет на методы производства наноструктур в нанотехнологии, синтез наноструктур, производство наночипов».

В следующих исследованиях В.-К. Хан и его команда планируют детально исследовать транспорт электронов в гибридном наноустройстве. По словам ученых, это поможет узнать, как использовать эти наноструктуры в производстве электронных чипов.

Работа исследователей была проведена в рамках программы Департамента энергетики США.

Серебряные цветы и карта Новой Зеландии в наномире[1]

Производство наноструктур и наноматериалов с наперед заданными свойствами – одно из главных направлений современных нанотехнологий. Каждый год технологии производства наноструктур совершенствуются, и нет месяца, в котором не разработали бы новую технологию. Здесь мы расскажем о двух революционных методах производства наноматериалов: выращивание наноструктур с «узорами» и плоских микроструктур произвольной геометрии. С помощью первого метода ученые смогли сделать «металлические цветы» размером в несколько микрометров, а с помощью другого – микрометровую карту Новой Зеландии высокого разрешения.

[1] Nanotechweb: Stressed-out microstructures form botanical-style patterns; Nanotech-Now: Nano cluster devices announces new nano-patterning technologies.

Начнем с описания первой технологии. Ее новизна состоит в том, что ученые из Китайской академии наук научились наносить на поверхности сферических и конических микроструктур ряд правильных форм, изменяя механические напряжения на поверхности образца. Полученные структуры обладают правильной симметрией и по расположению похожи на симметричные объекты, встречающиеся в ботанике. Как говорят ученые, этот новый метод может помочь в производстве макроскопических поверхностей с регулярными паттернами различной симметрии на их поверхности.

Микроструктуры, на которые ученые сумели нанести симметричный узор из наночастиц, состояли из серебряной основы, покрытой SiO_x. Зей-Хан Као, глава исследователей, предложил сделать уже готовые микроструктуры с наночастицами, испаряя нанопорошок Ag_2O и SiO на субстрате поликристаллического сапфира при температуре 1270 K. В результате этого у ученых получились жидкие капли серебра, покрытые тонким слоем SiO_x. Это и были основы для дальнейшего формирования текстурированных микроструктур. Постепенно охлаждая капли, исследователи добились возникновения неравномерных напряжений в материале, что привело к формированию регулярных симметричных наночастиц, находящихся на поверхности капли. Этот подход ученые назвали «инженерией напряжений» (stress engeneering).

На поверхности сферической микроструктуры сферулы (так назвали исследователи эти наночастицы) образовали узор, сводящийся к отдельным треугольникам (рис. 1.5).

Конечно, узор содержит некоторые дефекты симметрии, вызванные сферической формой капли. Симметрия такого рода часто встречается в растительной природе. Например, цветы некоторых растений, имею-

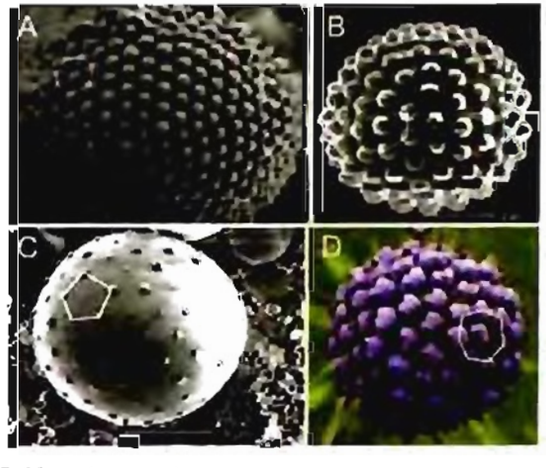


Рис. 1.5. Узор (паттерн) треугольниками

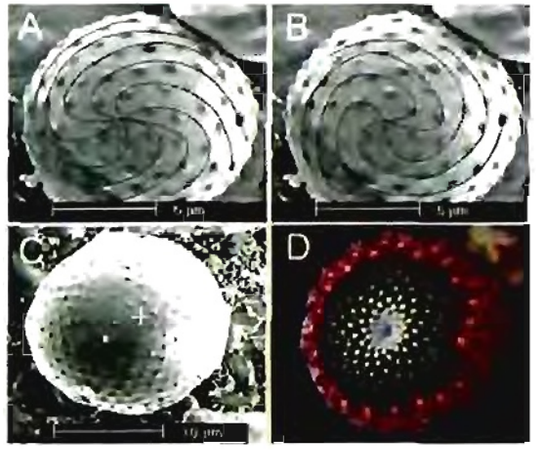


Рис. 1.6. Спиралевидные узоры

щие круглую форму, содержат триангуляционный узор. Далее ученые сделали ряд конических микроструктур похожим методом и попробовали образовать сферулы на их поверхности. Получился рисунок со спиралевидным узором (рис. 1.6), складывающимся в ряд Фибоначчи. Например, на поверхности конуса диаметром 9,5 мкм расположилось 92 сферулы, образовав последовательность Фибоначчи 5×8. А 18-микрометровый конус, покрытый 230 сферулами, образовал узор Фибоначчи 13×21. Этот последний узор можно встретить на поверхности кактуса Mammilaria nejapensis.

«Происхождение этих узоров в живой природе часто вызывает диспуты, – говорит Као. – В нашем случае точно известно, как образовались эти узоры – напряжение на поверхности распределяется так, чтобы минимизировать энергию стресса. Скорее всего, те же законы действительны и в живой природе. Узоры на цветах тесно связаны с распределением энергии стресса, а не с биохимическими или генетическими факторами».

Конечно, эти выводы чрезвычайно ценны для ботаников, однако технология нанесения на микроструктуры сферул поможет в микроэлектронике при создании различных гетероструктур и других полупроводниковых устройств. Так, например, матрицы, сформированные сферулами на поверхности «металл-полупроводник», могут найти применение в электронике на гибких основах и микрофотонике. «Можно даже создавать с помощью металлических сферул на полупроводниковой основе отдельные матрицы полупроводниковых приборов, это очень ценное достижение для микро- и наноэлектроники», – говорит в заключение Као.

Теперь расскажем о другом инновационном методе, разработанном в Новой Зеландии компанией Nano Cluster Devices Ltd (NCD). Как

говорит один из исследователей, Рене Рэйчел, «наша новая технология позволит убрать один производственный процесс, необходимый для микро- и нанолитографии при производстве микроэлектронных чипов».

С помощью нового метода ученые могут производить двумерные структуры любой геометрии. В доказательство этого они сделали карту Новой Зеландии размерами в 1000 раз меньше диаметра человеческого волоса (рис. 1.7). Как говорят представители компании NCD, ее технологии направлены на технологии сборки из отдельных кластеров нанометровых размеров плоских структур заданной формы.

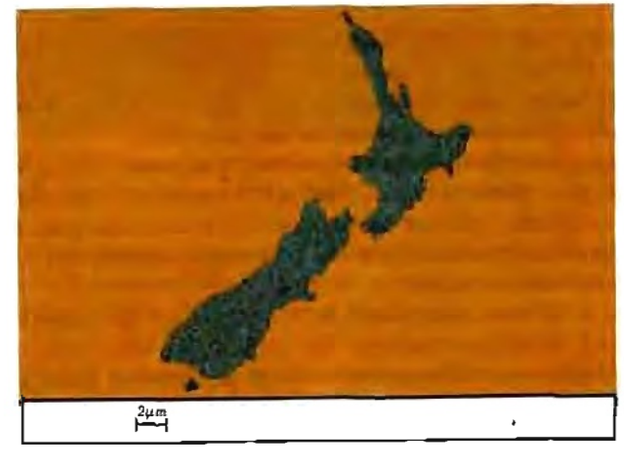


Рис. 1.7. Микрометровая карта Новой Зеландии

Технология кластеров позволяет решить еще одну проблему, часто возникающую в микроэлектронике. Это проблема «засорения трафарета», используемого в нанолитографии и микроэлектронике для производства нанопроводников. «Представьте себе краскопульт, с помощью которого через трафарет рабочий делает различные узоры. Со временем сопло краскопульта засоряется краской и распыляет уже не так точно, как это было вначале, – говорит Рене. – Мы же для производства наноструктур пользуемся вместо краски нанокластерами, которые распыляются в условиях, препятствующих их налипанию к рабочему инструменту. Вот почему с помощью нашей технологии мы можем достигать высокой точности в производстве двумерных структур. Также мы делаем очень тонкие и прямые нанопроводники, которые другими методами создать вообще невозможно».

Ранее компания NCD разработала метод производства нанопроводников путем самоорганизации нанокластеров. Совместив этот метод с технологией распыления, ученые получили возможность производить нанопроводники в больших количествах.

Нанопроводники — один из ключевых элементов в микроэлектронике. Они соединяют между собой отдельные части внутри микросхем и применяются в некоторых типах нанотранзисторов. Поэтому технологии, разработанные компанией NCD, очень важны для будущего развития микроэлектроники.

Как мы видим, нанотехнологии не стоят на месте, и с каждым днем ученые сообщают о новых методах производства наноструктур, продвигаясь по размерной шкале все ниже и ниже.

Что будет, если надавить на нанотрубку?[1]

Компактные и сверхбыстрые компьютеры, пуленепробиваемые футболки, космический лифт, роботы размером с клетку и меньше — все это обещают человечеству нанотехнологии, где будут использоваться в качестве основного материала углеродные нанотрубки.

Однако все эти чудеса невозможны без предварительных исследований наномира и нанообъектов. Поэтому ученые сегодня сосредоточились на детальном изучении свойств нанотрубок в наноразмерном диапазоне. Другими словами — без науки о наноразмерном диапазоне не было бы и нанотехнологий.

В новом исследовании ученые из Университета Джорджии (США) и их коллеги из исследовательского центра Уотсона IBM установили, что, несмотря на довольно большую жесткость углеродных нанотрубок, если их тянуть с обоих концов, они легко деформируются при надавливании посередине. Чем больше радиус нанотрубки, тем больше они прогибаются под надавливающим зондом. Это важное для наноэлектронных разработок заключение исследователи опубликовали в майском выпуске журнала Physical Review Letters.

«Мы уже хорошо знаем, что в осевом направлении нанотрубки чрезвычайно жесткие. Однако мы никак не могли проверить их радиальную жесткость из-за малых размеров этих нанообъектов. Как только мы пытались надавить на нанотрубку зондом, она соскальзывала и отодвигалась в сторону. Но теперь мы все-таки установили, что в радиальном направлении нанотрубки довольно эластичны», — комментирует Элиза Райдо, профессор физики из Университета Джорджии (рис. 1.8).

Чтобы надавить на нанотрубку, ученые воспользовались зондом атомно-силового микроскопа (АСМ) с радиусом рабочей части 35 нм. Они проделали серию нажимов на нее с разной силой для того, чтобы измерить эластичность нанотрубки.

«Серией слабых надавливаний мы смогли измерить радиальную эластичность однослойной и многослойной углеродной нанотрубки.

[1] The Georgia Institute of Technology. Like the Famous Doughboy, Nano-tubes Give When Poked (http://www.gatech.edu/news-room/release.php?id=565).

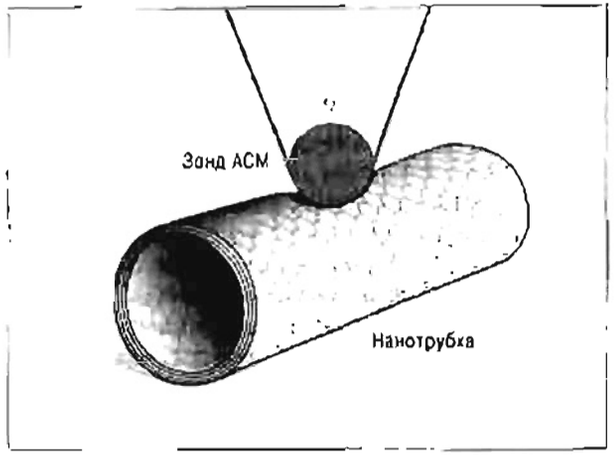


Рис. 1.8. Используя АСМ, исследователи надавили на середину нанотрубки, чтобы узнать, как она себя поведет

Также мы экспериментировали с нанотрубками разных радиусов и установили, что нанотрубки меньшего радиуса намного жестче в радиальном направлении, чем те же с большим радиусом», — сказала Райдо.

Элиза Райдо и ее коллеги начали серию исследований с однослойной нанотрубки радиусом 0,2 нм и потихоньку добрались до нанотрубок радиусом 12 нм. Всего ученые измерили радиальную эластичность 39 нанотрубок. «Затем мы повторили те же измерения с многослойными нанотрубками. Наши исследования показали, что многослойные нанотрубки с малым внутренним радиусом жестче, чем такие же с большим внутренним радиусом», — продолжает Райдо. Однако для многослойных нанотрубок с большими радиусами эластичность объекта в целом — постоянная величина. Это значит, что ослабление радиальной жесткости нанотрубки происходит с увеличением жесткости из-за отдельных слоев.

Понимание того, почему нанотрубки имеют различную жесткость из-за радиуса и числа слоев, а также анализ радиальной и осевой жесткости помогут ученым в дальнейших исследованиях в области нанопроводников и наноэлектронных устройств. Как недавно доказали исследователи из Калифорнийского университета, транзисторы на основе нанотрубок могут работать гораздо быстрее обычных полупроводниковых ключей.

Дальнейшая цель Райдо — измерение эластичных свойств нанотрубки с постоянным внешним радиусом и изменяющимся числом слоев, и наоборот. Так ученые узнают, как число и радиус слоев влияют на эластичность нанотрубки в целом.

Светоизлучающие нанотрубки в телевизорах и дисплеях[1]

Углеродным нанотрубкам уже найдено немало разнообразных применений, в том числе в качестве элементной базы для будущих наноэлектронных схем, однако в компании Applied Nanotech полагают, что могут предложить еще одно – в плоскоэкранных телевизорах и дисплеях нового поколения.

Напомним, что нанотрубки из углерода, используемые в качестве полупроводниковых приборов, были впервые обнаружены в лаборатории NEC, которой принадлежат права на коммерческое использование этих технологий и которая собирается выпустить первый чип на нанотрубках к 2010 г.

Нанотрубки, как было открыто в конце 1990-х гг., проявляют себя как проводники или как полупроводники в зависимости от ориентации шестиугольников, состоящих из атомов углерода, относительно направления оси нанотрубки (хиральности), а также от различных примесей, входящих в состав нанотрубки.

Ранее созданные микроскопические твердотельные излучающие нанотрубки электрически управлялись «модулятором» из одной-единственной молекулы. Новые светоизлучающие нанотрубки (light-emitting nanotube, LEN) (рис. 1.9) излучают в диапазоне 1,5 мкм, что в перспективе делает потенциально возможным создание оптических коммуникационных элементов на кремниевых подложках с интегрированными LEN-излучателями диаметром всего 1,4 нм.

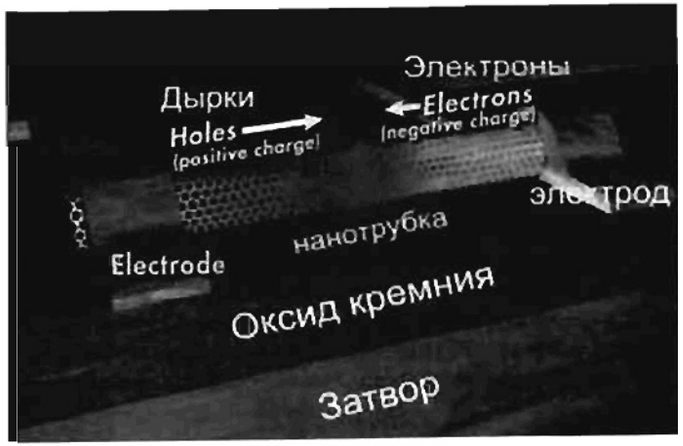


Рис. 1.9. Принцип работы светоизлучающих нанотрубок

[1] EE Times; IXBT: Светоизлучающие углеродные нанотрубки.

В телевизорах нового поколения Applied Nanotech предлагает использовать нанотрубки в качестве источников света, чтобы заменить лампы подсветки в жидкокристаллических телевизорах большой диагонали (40–60 дюймов). Причем компания надеется это сделать к 2007 г., т.е. всего через четыре года после того, как светоизлучающие нанотрубки были впервые созданы.

Как сообщает источник, Applied Nanotech, являющаяся дочерней фирмой Nano-Proprietary, создала лампу подсветки, используя технологии печати чернилами на основе нанотрубок. В отличие от обычных ламп, в новой разработке используются фосфоросодержащие покрытия и катод, в буквальном смысле напечатанный чернилами на основе металлической краски и собственно нанотрубок.

Себестоимость созданных таким образом ламп подсветки очень невысока (в отличие, скажем, от катодов, в которых нанотрубки бы выращивались), что очень важно для безумно дорогих на сегодняшний день больших дисплеев.

Утверждается, что созданная по новой технологии лампа подсветки для 32-дюймовых телевизоров потребляет от 50 до 60 Вт. Applied Nanotech продемонстрировала подробности своей технологии на выставке NanoEurope 2005 в Швейцарии.

Стоит также отметить, что кроме Applied Nanotech возможностями применения технологий нанотрубок в дисплеях в качестве источников света также интересуются и такие производители, как, например, Samsung.

Кисть из нанотрубок[1]

На сегодняшний день ученые довольно много узнали о свойствах нанотрубок. Пришло время составлять из них сложные конструкции и наносистемы. Однако первую более-менее сложную структуру, изготовленную из нанотрубок, можно смело назвать «нановеником». Профессор Паликель Аджаян (об этом ученом, работающем в области исследования свойств нанотрубок, мы уже писали) и его коллеги из Политехнического института в Нью-Йорке создали самую маленькую в мире щетку, щетинки которой – не что иное, как отдельные нанотрубки. Диаметр каждой нанотрубки 30 нм, т.е. каждый волос щетки в тысячу с лишним раз тоньше человеческого волоса.

Исследователи не собирали веник «по волоску», а вырастили нанотрубки прямо на ручке щетки. А чтобы вся ручка не обросла ворсом из

[1] BBC NEWS: Brush Up Your Nanotechnology (http://news.bbc.co.Uk/2/hi/science/nature/4085214.stm).

нанотрубок, ученые покрыли ее местами тончайшим слоем золота. Нанотрубки они выращивали, используя обычный метод синтеза нанотрубок, состоящий в том, что в атмосфере горячего газа, содержащего углерод, на нитях углеродистого силицида происходит рост этих наноструктур.

Как и обычные щетки, это достижение нанотехнологий имеет несколько способов применения: ими можно «подметать» нанопыль (рис. 1.10) на сверхминиатюрных НЭМС- и МЭМС-устройствах, окрашивать микроструктуры и удалять загрязнители из воды. Также кистью можно прочищать тонкие капилляры подобно тому, как мы чистим бутылки ершиком. Поэтому нанокисть, по мнению изобретателей, будет востребована медиками – они смогут использовать ее в будущем для «прочистки» сосудов и удаления атеросклеротических бляшек.

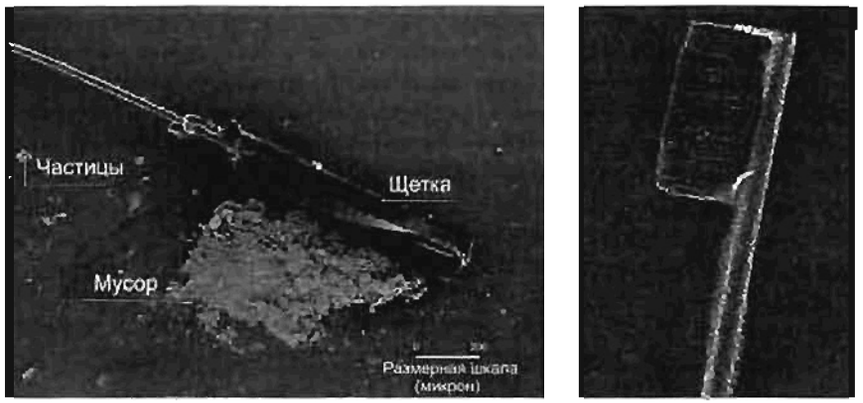


Рис. 1.10. Щетка из нанотрубок в действии

Как говорит Аджаян, эта щетка – одно из первых гибких наноустройств. Это свойство очень полезно в наномире, так как многие микро- и нанообъекты имеют сложную геометрию, а гибкий инструмент с большим числом степеней свободы сможет проникнуть даже в самые труднодоступные места.

Как говорят исследователи, щетка проводит электричество. Этого и стоило ожидать, ведь углеродные нанотрубки сами по себе хорошо проводят электричество.

Исследователи даже попытались сделать зубную «наношетку»! Один из исследователей предполагает, что такие щетки будут полезны при нанесении ультратонких покрытий на труднодоступные места. С их помощью можно будет даже отлавливать отдельные вирусы и бактерии, предварительно покрыв устройство специфическими антителами.

Нанотрубки для топливных элементов[1]

Уникальные свойства углеродных нанотрубок (УНТ) и нановолокон (УНВ) – высокая удельная поверхность, электропроводность, прочность – позволяют создавать на их основе эффективные носители катализаторов для различных процессов. Неудивительно, что эти новые углеродные наноматериалы вызвали большой интерес у разработчиков топливных элементов (ТЭ) (*топливные элементы (fuel cells) – химические источники тока, допускающие длительную непрерывную работу благодаря постоянному подводу к электродом жидких или газообразных реагентов (топливо подается к одному электроду, а окислитель, обычно кислород, – к другому). Наиболее перспективным топливом является водород; в так называемых прямых метанольных топливных элементах используется метанол*) и энергоустановок на их основе – в ТЭ используются электрокатализаторы (металлы платиновой группы) именно на углеродных носителях. В последнее время большое внимание уделяют топливным элементам с твердым полимерным электролитом (ТПЭ). В России их успешные исследования и разработки ведутся в РНЦ «Курчатовский институт» и некоторых других организациях. В качестве носителей катализаторов сейчас, как правило, используют сажу или технический углерод. Недавние эксперименты показали, что замена их на углеродные нанотрубки или нановолокна позволяет повысить активность электрокатализаторов и эффективность работы топливных элементов с ТПЭ.

Так, китайские исследователи синтезировали катализатор из наночастиц платины на УНТ (10 вес. % Pt) и использовали его в качестве катодного электрокатализатора для прямых метанольных топливных элементов вместо обычного катализатора на углероде марки ХС-72. Продемонстрирована высокая активность восстановления кислорода и более эффективная работа ТЭ. Российские ученые (РХТУ им. Д.И. Менделеева) разработали электрокатализаторы на основе УНТ и УНВ (в том числе в виде «нанобумаги») с нанесенными наночастицами Pt и Pd .

Исследования выявили зависимость электрохимических характеристик от размеров и морфологии УНТ и УНВ (рис. 1.11), которые, в свою очередь, определяются размерами, формой и распределением частиц катализатора, а также условиями синтеза. Для создания эффективного носителя катализаторов для топливных элементов с ТПЭ авторы синтезировали и исследовали углеродные нанотрубки и нановолокна разных размеров и морфологии (УНТ диаметром 25 и 15 нм; скрученные УНВ диаметром 40, 65 и 100 нм; прямые УНВ диаметром 70 нм). В эксперименте использовали метод термического каталитического CVD (источник углерода – ацетилен; катализаторы Ni-MgO, полученные механохимическим путем).

[1] Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 6.

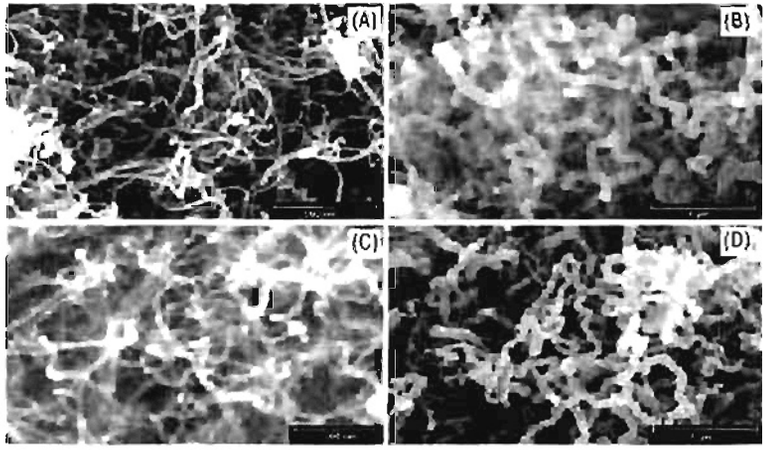


Рис. 1.11. УНТ и УНВ, синтезированные при разных температурах на катализаторе, обработанном механохимическим методом в течение 360 мин: A – 500°C; B – 600°C; C – 650°C; D – 700°C [6]

Основные факторы, влияющие на размеры и морфологию УНТ и УНВ, – длительность механохимической обработки катализатора и температура CVD. Средние диаметры УНТ и УНВ – 25–100 нм, диаметры скрученных УНВ – 65, 40 и 10 нм. После очистки и химического восстановления платины полученные образцы 20% Pt/УНТ или Pd/УНВ наносили в качестве каталитического слоя на газодиффузионный слой/подложку электродов. Мембрано-электродный блок создан из двух электродов с полимерной электролитической мембраной (Nafion 1035) между ними.

Вольтамперные характеристики топливных элементов с электродами из шести разных типов Pt/УНТ и Pd/УНВ получены при 800°C и давлении $9{,}8 \cdot 10^4$ Па. Лучшие результаты получены для УНТ и УНВ с меньшими диаметрами (см. табл.). Интересно, что наиболее эффективными оказались скрученные УНВ (возможно, неровная поверхность скрученных нановолокон малого размера способствует равномерному распределению частиц Pt).

Таблица

Тип элемента	Диаметр, нм	Напряжение, мВ (при плотности тока 500 мА/см²)
Скрученные УНВ	65	645
УНТ	25	609
Прямые УНВ	70	532

Активность и оптимизм авторов вселяют надежду – уже в ближайшем будущем углеродные нанотрубки и нановолокна начнут работать в реальных топливных элементах.

Наноструктуры по шаблону[1]

Исследователи из Политехнического института Ренсселеера создали керамические шаблоны, на которых удалось вырастить ветвящиеся нанотрубки с ранее заданной конфигурацией ответвлений. При этом нанотрубки могут ветвиться иерархически, создавая несколько разветвляющихся пучков. Ученым удалось вырастить таким образом не только нанотрубки, но и металлические нанопроводники. В качестве основы для шаблона исследователи использовали подложку из анодированного оксида алюминия (рис. 1.12). «Наше управление ростом и ветвлением нанотрубок очевидно. Достаточно взглянуть на СТМ-фотографии, – говорит Паликель Аджаян, один из исследователей. – Морфология полученных нанотрубок схожа с морфологией дендромеров, поэтому трудно представить, что синтез этого нанодерева произошел по заданной заранее программе».

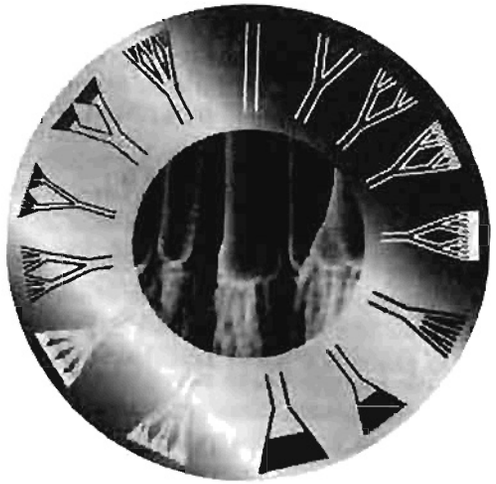


Рис. 1.12. Шаблоны и полученные наносистемы на основе нанотрубок

Аджаян, Гуовен Менг и их коллеги сделали подложки из алюминия методом анодирования, в процессе которого они изменяли напряжение. Другие исследователи создали углубления на подложке в виде символа Y, еще раз изменив напряжение анодирования. Проделав эту операцию 4 раза, ученые получили массив вытравленных на подложке Y-веток. При этом ученым удалось получить до 16 разветвлений на матрице-подложке. Комбинируя разветвления и простые Y-углубления, команда получила массу различных разветвляющихся «шаблонов», размер которых исчисляется десятками нанометров.

[1] Nanotechweb. Nanostructures branch out with templates (http://www.nanotechweb.org/articles/news/4/5/3/1).

Для того чтобы привязать углеродные наноструктуры к этим шаблонам, ученые синтезировали их непосредственно в углублениях, проведя реакцию пиролиза ацетилена. Затем ученые удалили слой оксида алюминия путем травления, открыв полученные углеродные нанотрубки различной формы. В другом эксперименте Менг и коллеги вырастили внутри подложки-матрицы нанопроводники из никеля. «Так как мы разработали общий принцип производства наноструктур по определенному шаблону, то теперь станет легко изготавливать металлические, полупроводниковые, полимерные, углеродные наносистемы», – говорит Аджаян. Также исследователи уверены, что смогут создать гетероструктуры различной формы на основе нанотрубок. При этом такая наносистема может состоять из трех и более компонентов. «Конечно, одна из областей практического применения нашего открытия состоит в создании микроэлектронных схем на основе новых гетероструктур. Это и сенсоры, детектирующие отдельные молекулы, и нанопроводники, обеспечивающие перенос сигнала от нано- к микромасштабу, и как ни странно, системы доставки лекарств, – заключает Аджаян. – Но безусловно помимо этого наше открытие позволит создавать заранее спроектированные наноструктуры со сложной архитектурой. Это очень важно для развития нанотехнологий и наноинструментария».

Батарейку от Toshiba можно зарядить за 60 секунд[1]

Компания Toshiba разработала литиево-ионную батарею на основе наноматериалов, которая заряжается примерно в 60 раз быстрее обычной. За одну минуту ее можно заправить на 80%, а полная емкость аккумулятора (у первого образца она была равна 600 мА·ч) заполняется через несколько минут (рис. 1.13).

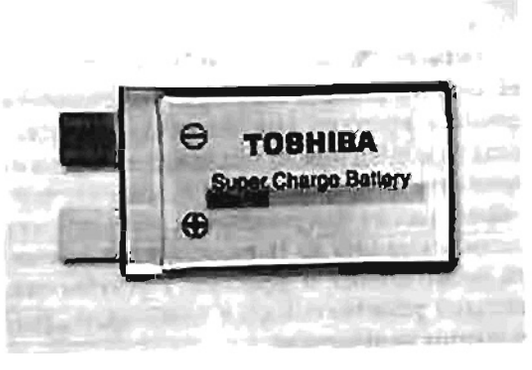


Рис. 1.13. Нанобатарейка (3,8×62×35 мм)

[1] New battery offers unsurpassed recharge performance and high energy density (http://www.toshiba.co.jp/ about/ press/ 2005_03/ pr2901.htm).

Как сообщает компания, новый аккумулятор обладает рядом других преимуществ перед распространёнными аккумуляторными батареями (в том числе литиево-ионными).

Создать нанобатрейку удалось благодаря новой технологии, основанной на использовании наночастиц, находящихся в составе материала отрицательного электрода батареи. При зарядке батареи наночастицы быстро собирают и хранят ионы лития.

Прекрасные показатели времени зарядки батареи – не единственное достоинство прототипа. Нанобатарея будет служить дольше: за 1000 циклов заряда-разряда она теряет всего 1% своей емкости. Также она может работать на сильном морозе: при температуре –40°С емкость батареи составляет 80% (при +25°С она равна 100%).

Опытный образец имеет размеры 3,8×62×35 мм и предназначается, в первую очередь для бытовой электроники и мобильных электронных устройств. Однако данную технологию Toshiba намерена распространить и на другие области, например гибридные автомобили.

На рынке скоростная батарейка появится в 2006 г.

Батарейка на основе «нанотравы» от mPhase Technologies[1]

Компания mPhase Technologies в сотрудничестве с Bell Labs и научно-исследовательским подразделением Lucent Technologies создала батарею, основанную на достижениях нанотехнологии. Ключевые преимущества нового источника питания – возможность интеграции в полупроводниковые изделия и большой срок хранения.

Во многих устройствах необходим резервный источник питания. Как известно, обычные батареи теряют около 10% емкости за один год хранения, поэтому в таких случаях часто используют батареи, в которых химические материалы объединяются в нужный момент механическим способом. Эти изделия могут храниться достаточно долго, они надежны и могут обеспечить большую плотность энергии. К сожалению, такие батареи трудно сделать миниатюрными. Кроме того, процесс их производства слишком отличается от процессов производства полупроводниковых компонентов, и батареи не могут быть встроены непосредственно в микросхемы. Еще одним ограничением существующих батарей является потребность в механическом усилии для активации, вследствие чего переход в рабочее состояние занимает довольно много времени. Необходимость иметь резервуар для электролита и механизм активации уменьшает полезный объем внутри источника питания.

В основе работы как новой, так и существующих батарей лежит химическая реакция. Нанотехнологии обеспечивают уникальный способ со-

[1] IXBT: mPhase Technologies представляет нанобатарейку (http://www.ixbt.com/ news/hard/index.shtml? news1 18268id).

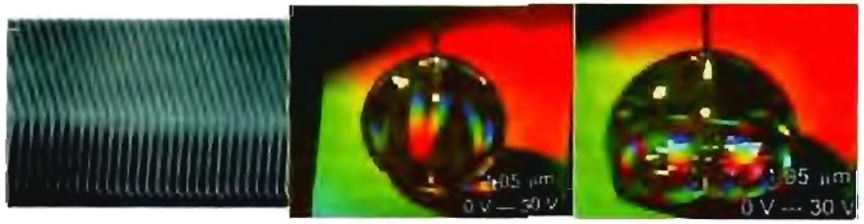


Рис. 1.14. «Нанотрава» и электролит — основные составляющие нанобатарейки

единения химических компонентов и управления параметрами реакции. На рис. 1.14 показан пример трубчатой наноструктуры, так называемой «нанотравы». Из нее формируется сверхгидрофобная наноструктурированная поверхность («Superhydrophobic NanoStructured Surface»), над которой размещается капелька электролита. Капелька находится над трубочками, не взаимодействуя с ними. В нужный момент ее можно заставить упасть в пространство точно между трубочками, моментально увеличив площадь поверхности, на которой электролит взаимодействует с материалом батареи, вызывая электрический ток. Падение капельки можно вызвать разными способами, например импульсом напряжения или радиоизлучения.

Новая технология значительно увеличивает срок хранения батареи — до 15–20 лет. К другим преимуществам относятся высокая скорость активации элемента питания и выход на полную мощность, совместимость с технологическими процессами производства полупроводников, высокая плотность энергии. Батарея легко поддается миниатюризации и может быть изготовлена из материалов широкого спектра. Кроме того, как обещают разработчики, новинка будет очень дешевой при массовом производстве. Другими словами, потенциал батареи mPhase в самых разнообразных областях применения, включая космическую и оборонную отрасли, бытовую и промышленную электронику, средства спасения и здравоохранения, огромен. По крайней мере, так считают аналитики из компании Frost & Sullivan Research, присвоившие проекту престижную награду.

По оценке разработчиков, на выход коммерческого продукта понадобится полтора-два года.

Создана прозрачная нанотканьс прочностью стали[1]

Нанотрубки, похоже, становятся открытием №1 в области нанотехнологий. Две различные команды исследователей из США и Австралии создали прозрачную ткань, состоящую из нанотрубок длиной 1 (!) м и шириной 5 см. Ранее ученым удавалось получить нанотрубки длиной только несколько сантиметров.

[1] Nanotechweb.org: Carbon-nanotube fabric measures up.

Рис. 1.15. Нанотканьиз нанотрубок. Эмблема снизу показывает прозрачность ткани

Как и ожидалось, лента обладает высокой прочностью. Соотношение прочность/масса материала ленты выше, чем у стали высокой закалки. При этом ткань возможно оборудовать органическими светодиодами, превратив ее в гибкий сверхтвердый OLED-экран. Это похоже не на «рядовое» открытие, а на научную фантастику. Тем не менее это так. Давно известно, что нанотрубки по прочности превосходят сталь и при этом способны проводить электричество. Вся загвоздка состояла в том, что до сих пор их не могли производить длиннее 2 см и тем более не могли прясть из них ткань.

«Нанотканьожидает масса применений: строительные материалы, снаряжение, бронежилеты, OLED-дисплеи; всего и не перечислить... — говорит Рэй Бохман из Техасского университета. — То, что это очень ценный и востребуемый продукт, ускорит его коммерциализацию, и, я уверен, мы увидим уже скоро в различных продуктах использование нанотекстиля».

Нанотканьь (рис. 1.15) — это, конечно, не массив «цельных» нанотрубок, а композит, состоящий из переплетенного «леса» многослойных нанотрубок длиной 245 мкм и диаметром 10 нм. Образец таких спутанных нанотрубок длиной всего 1 см может «развернуться» в трехметровую ленту 18-микрометровой толщины. Если же использовать пластиковый цилиндр в качестве валка, по которому протягивается лента, то исходный материал можно раскатать до десятиметровой длины. Оборудование ученых обеспечивало «разворачивание» леса до 1 м/мин.

В результате первого цикла производства у ученых получился анизотропный аэрогель на основе нанотрубок с плотностью 0,0015 г/см³. Этот лист выдерживал миллиметровые капли, которые были в 50 000 раз тяжелее места контакта с аэрогелем.

Но ученые решили сделать нанотканьь более прочной. Для этого они поместили пленку из нанотрубок на плоскость и вертикально погрузили ее в раствор этанола. При этом погружение велось в направлении соединения нанотрубок между собой. После того как пленку вытащили, испарение этанола вызвало сокращение толщины пленки до 50 нм из-за эффектов поверхностного натяжения. При этом плотность пленки стала равна 0,5 г/см³.

Усиленная нанопленка и есть конечный продукт. Она прозрачна и проводит электричество. Вдоль направления нанотрубок сопротивление ткани составляет 700 Ом/м². При этом сопротивление остается постоянным при изгибе пленки в любом направлении.

Как говорят ученые, наноткань может использоваться даже в системах освещения, заменяя традиционные лампы дневного света и лампочки. Прочность пленки – 160 МПа/(г/см³). Прочность полимерных пленок майлар и каптон, использующихся в сверхлегких самолетах, – 140 МПа/(г/см³), а прочность закаленной стали – 125 МПа/(г/см³).

Новый метод производства нанотрубок, названный технологией «развертки», имеет ряд преимуществ перед химическим синтезом наноструктур, так как до сих пор удавалось получить нанотрубки длиной только 2–3 сантиметра.

Возможно, благодаря этому открытию запуск коммерческого космического лифта в 2018 г. может-таки состояться. Напомним, что основная составляющая космического лифта, транспортирующего грузы на орбиту Земли и гораздо дальше, – сверхпрочная и легкая лента на основе нанотрубок.

Нанопокрытие NanoMATRIX для одежды[1]

Японская компания Toray Industries заявила, что она создала новую технологию обработки тканей, которая позволяет наносить на каждый монофиламент ткани определенный наноматериал. Как заявило руководство компании, этот прорыв в производстве был достигнут благодаря новым достижениям в области самосборки наноструктур.

Новая технология обработки тканей «NanoMATRIX» позволяет наносить на монофиламенты обрабатываемой ткани покрытие толщиной от 10 до 30 нм (рис. 1.16). Такое полное покрытие филаментов ткани на сегодняшний день было достичь невозможно, утверждает руководство. Современные текстильные технологии позволяют наносить покрытие в пространство между монофиламентами или в участках пересечения волокон ткани.

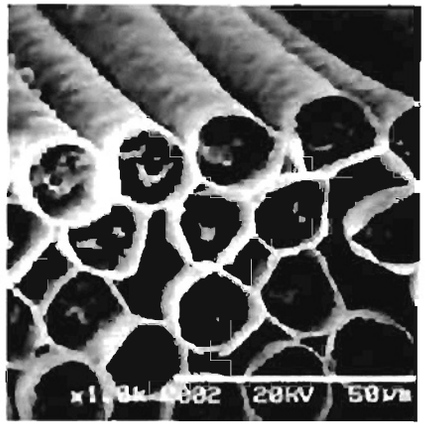


Рис. 1.16. СТМ-изображение нанопокрытия «NanoMATRIX» отдельных монофиламентов полиэстера

[1] Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 2.

Технология «NanoMATRIX» стала возможной благодаря нанотехнической самосборке. Исследователи изменяли окружающие условия (температуру, давление, электрическое поле и т.д.) для того, чтобы молекулы материала, который необходимо нанести на ткань, образовали покрытие на полиэстеровых монофиламентах.

При обработке ткани с помощью новой технологии отдельные монофиламенты не повреждаются и текстура ткани не изменяется.

Как говорят специалисты из Toray Industries, новая технология не позволит растягиваться вещам, изготовленным из обработанной ткани. Также можно будет изготовить водоотталкивающие и антистатические ткани на основе уже использующихся материалов (хлопка, полиэстера).

Нанотехнологии выходят на корт[1]

Рис. 1.17. Серию наноракеток от фирмы Babolat можно купить в России

В конце августа, когда лучший теннисист мира Роже Федерер выйдет на корт U.S.Open, у него будет ракетка, снабженная наночастицами, благодаря которым она при сохранении своей массы станет прочнее. Ракетка Андре Агасси при соприкосновении с мячом будет «принимать его форму», что слегка усиливает контроль во время игры.

Но производители этих ракеток делают технологию доступной и для тех, кто играет в теннис на досуге. Фирмы Head, Prince, Babolat, Wilson и Fischer, использующие нанотехнологии, снабжают ракетки (рис. 1.17) магнитной силой, аэродинамическими и другими свойствами, которые позволяют игрокам увеличить мощь и точность удара.

Австрийская фирма Fischer GmbH, известный производитель лыжного снаряжения, в сентябре представит высокотехнологичную ракетку, обладающую магнитными свойствами. Ракетка, получившая название Magnetic Speed, осна-

[1] Pittsburgh Post-Gazette: Nanotechnology hits the tennis court; перевод: Inopressa: Нанотехнологии выходят на корт.

шена однополярными магнитами, установленными на ободе. Магниты отталкиваются друг от друга, что позволяет ракетке сохранять форму после столкновения с мячом. Идея в том, что быстрое восстановление увеличивает скорость полета мяча. Чтобы магниты заряжались, в ручке ракетки установлены пьезоэлектрические кристаллы. Ракетка стоимостью 189 долл. США появится в продаже нынешней осенью. В Европе ею уже пользуются такие спортсмены, как Андрей Павел и Вера Звонарева.

Новые ракетки призваны вызвать новый приступ интереса у любителей. Продажи теннисного снаряжения в последние годы выросли, но они ниже, чем десятилетие назад. По данным Ассоциации теннисной индустрии, в 2004 г. компании продали около 3,9 млн ракеток. Это больше, чем 3,1 млн в 2003 г. и 3,3 млн – в 2002-м, но меньше, чем 4,4 млн в 1992 г.

«Технологические новшества заставляют потребителей покупать новые модели», – говорит Марк Мейсон, владелец специализированного магазина Mason's Tennis на Манхэттене, который продает почти 2 тыс. ракеток в год. Поэтому компании и мудрят с формами и материалами. Ракетка Flexpoint голландской компании Head NV, которую предпочел Агасси, снабжена отверстиями и «впадинами» на обеих сторонах обода. Компания утверждает, что впадины увеличивают гибкость и ракетка принимает форму мяча.

Компания разработала девять моделей для игроков разного уровня. Ракетка стоит около 200 долл. Частная компания Prince Sports Inc. из Нью-Джерси изменила форму отверстий для струн. На смену крошечным круглым отверстиям пришли крупные овальные, что делает струны более чуткими. Компания утверждает, что увеличивается также аэродинамичность и игроку легче посылать ракеткой мяч.

Созданы четыре модели стоимостью от 220 до 300 долл. Ими играют аргентинцы Гильермо Кория и Паола Суарес. Компании меняют не только дизайн, но и материалы. Французский производитель Babolat в 2003 г. начал с того, что вмонтировал в свои ракетки углеродные нанотрубки. Трубки в 10 раз плотнее графитовых и служат очень долго. Ракетка кажется более жесткой, что увеличивает силу удара. Стоимость ракеток для любителей – 199 долл.

Крупнейший в США производитель ракеток, чикагская компания Wilson Sporting Goods Inc. начала снабжать свои ракетки nCode – выбор Федерера – кристаллами двуокиси кремния прошлой весной. Ими играют Серена и Винус Уильямс.

Звезды тенниса не всегда охотно берутся за высокотехнологичные ракетки. Но соглашения между производителями и профессионалами нередко подразумевают, что известные игроки вооружатся новейшими технологиями.

Правила тенниса разрешают пользоваться множеством вариантов ракеток. Международная теннисная федерация не занимается оценкой ракеток, она лишь проверяет их на предмет соответствия правилам, когда

с такой просьбой обращаются производители или когда поступают жалобы на то, что правила нарушены.

Все ускоряющийся темп изменений иллюстрирует тот факт, что Международная теннисная федерация меняла правила, касающиеся ракеток, 14 раз с 1978 г., когда они впервые были облечены в слова. И похоже, что в ближайшее время эта тенденция не замедлится.

Наноматериалы частично поражают легкие[1]

Наноматериалы – сегодняшние фавориты индустрии – выявлены в номенклатуре выпускаемых изделий от косметики до электроники. Тем не менее новое исследование на животных показало, что, попав при дыхании в легкие, эти микроскопические сферы (фуллерены) и углеродные нанотрубки могут стать причиной больших проблем, особенно для рабочих, изготавливающих их и манипулирующих ими.

Это заявление поступило со встречи Общества по токсикологии, проходившей в Нью-Орлеане. Особенно ошеломили сообщения, раскрывающие детали того, как наноматериалы взаимодействуют с организмом человека. Большинство исследований фокусировалось на эффектах воздействия на легкие, потому что размер частиц позволяет им достигать их наиболее чувствительных тканей.

John T. James из NASA Johnson Space Center в Хьюстоне и его коллеги впрыскивали наночастицы в дыхательные пути мышей и исследовали их через неделю, а затем через 3 месяца. Несмотря на то что фуллерены не вызывали повреждений, равное по массе количество углеродных нанотрубок причиняло значительное повреждение легким и даже вызвало смерть нескольких животных.

Воздействие наночастиц и нанотрубок на ткани животного видно на одном из рисунков: клетки иммунной системы, называемые макрофагами, захватывают нанотрубки, но затем погибают (рис. 1.18). На рис. видно, как воспаление постепенно переходит в рубцевание ткани легких (так называемая гранулема легких) при воздействии на ткань раствора нанотрубок.

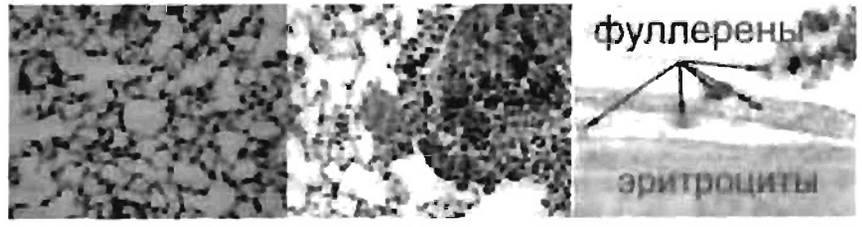


Рис. 1.18. Развитие воспаления тканей легких от воздействия на них раствора фуллеренов и нанотрубок

[1] Exposure to minute particles harms lungs, circulatory system (http://www.sciencenews.org/articles/20050319/fob1.asp).

Джеймс описывает дозу, которую использовала его группа, как завышенную. Он полагает, что при текущей федеральной норме ПДК (предельно допустимой концентрации) для вдыхаемого углерода (не структурированного в виде наноматериалов) рабочие могут получить эквивалентную дозу за 17 дней.

Исследователи во главе с Petia Simeonova из National Institute of Occupational Safety and Health in Morgantown в Западной Вирджинии также наблюдали насыщенные наночастицами гранулемы в тканях подопытных мышей, получивших схожие дозы углеродных трубок.

Исследователи также оценивали повреждение митохондриальной ДНК в тканях сердца и аорты. Митохондриальное повреждение предвещает начало атеросклероза. Опыты на мышах, подвергшихся воздействию нанотрубок, продемонстрировали значительное повреждение ДНК, которое продолжалось по меньшей мере 6 месяцев. Simeonova заявила, что произошло существенное повреждение тканей — а это еще один фактор риска для атеросклероза — в сердце, аорте и легких животных.

На собрании Akinori Shimada из Tottori University (Япония) представил первую серию снимков, изображающих наночастицы, попадающие из легких в кровь. Контактируя в течение минуты с капиллярами дыхательных путей тканей легких мыши, углеродные наночастицы начинают поступать через межклеточное пространство в капилляр. Там отрицательно заряженные наночастицы улавливаются красными кровяными клетками, которые в организме имеют положительный заряд. Если это присоединение вызовет смену знака заряда на поверхности клетки крови, предполагает Shimada, это может стимулировать скопление и образуется тромб.

Исследователи из University of Rochester (N.Y.) сообщили об увеличении чувствительности свертываемости крови у кроликов, которые вдыхали углеродные фуллерены. Команда повреждала кровеносные сосуды уха животных лазером и затем измеряла время образования тромба.

Имитируя загрязнение воздуха в городе, исследователи давали кроликам воздух, содержащий 70 мк/м³ фуллеренов, в течение 3 часов. В этом режиме время свертывания составило меньше половины от времени испытания, проведенного двумя днями ранее, при котором животные дышали чистым воздухом. Эффект проявлялся вскоре после воздействия, сообщает Alison Elder.

Многие исследователи, допускающие потенциальную опасность наночастиц, указывали, что на производствах часто используются многочисленные токсины и опасные вещества. «Эти исследования очень важны, — сказал на заседании Anthony Seaton, почетный профессор University of Aberdeen (Шотландия). — Будет замечательно, если промышленность сохранит КДК низким».

ГЛАВА 2

НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Нанотрубка в роли транзистора[1]

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).

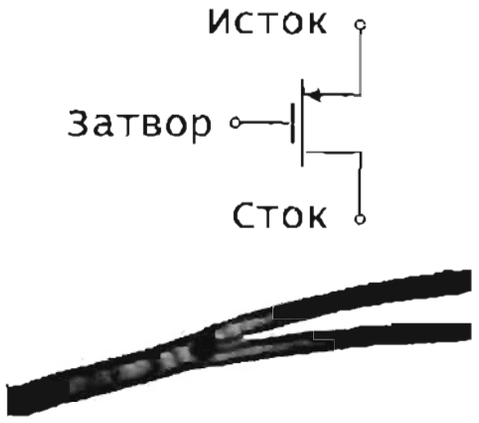


Рис. 2.1. Схема Y-транзистора

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 нанотранзистором 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-

[1] 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 вольтамперных 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 наноэлектронике».

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

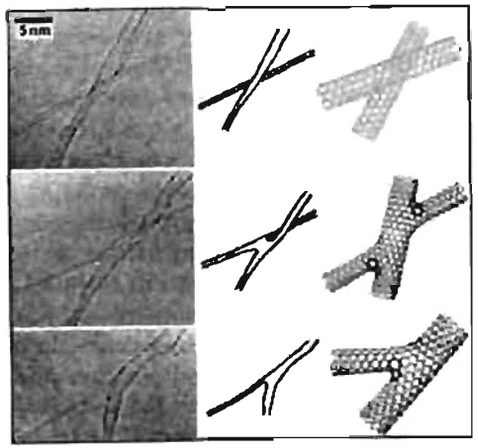


Рис. 2.2. Нейросетевой чип с Y-переходами

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 подобия, сформированные нанотрубками, уже довольно хорошо известны ученым, а их перевод на электронную базу с учетом свойств Y-соединений не вызовет 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[1]

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 наноэлектронике. 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 микроэлектронных 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.

[1] Nanotechnology-Now (23 октября 2004 г.).

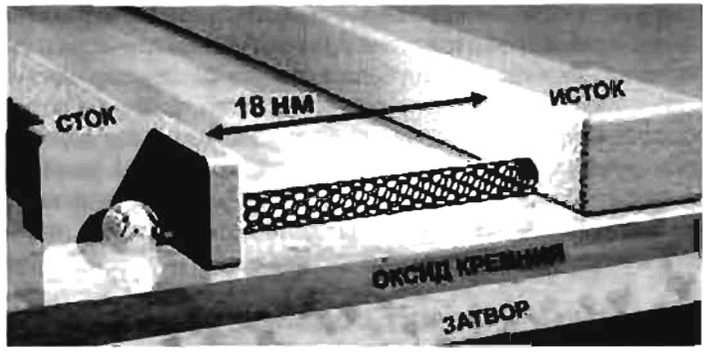


Рис. 2.3. Полевой нанотранзистор на основе нанотрубки от Infineon

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[1]

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 технологии 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 объявила 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 использующиеся в серийном производстве.

[1] Infoworld.com: IBM triples transistor performance with germanium (7 декабря 2004 г.).

Транзистор с плавником от Infineon уменьшил flash-память[1]

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.

[1] 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 бит, 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[1]

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

[1] 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[1]

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-

[1] 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.

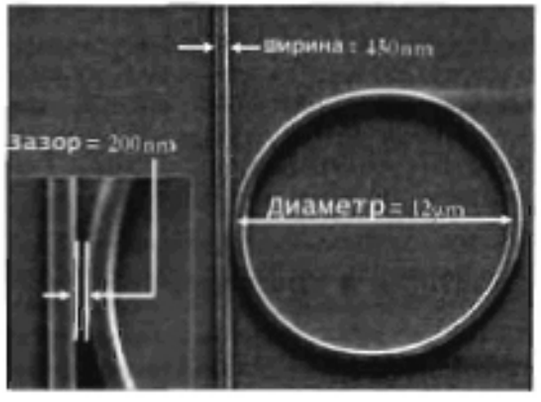


Рис. 2.5. Микрофотография фотонного чипа

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.

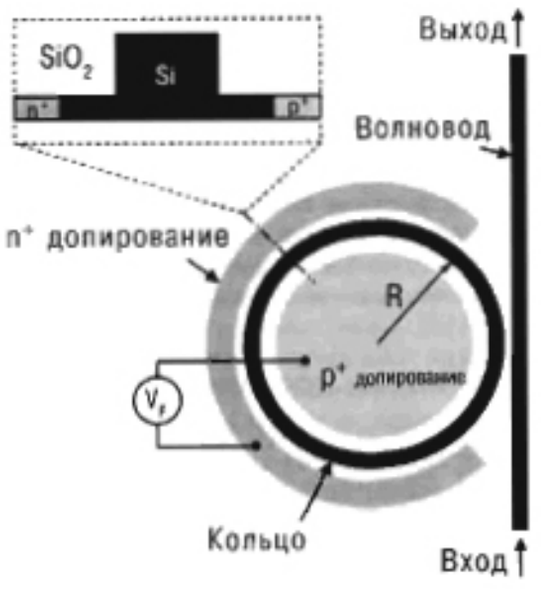


Рис. 2.6. Принцип действия фотонного ключа

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 огибает 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 волноводов 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[1]

Компания HP впервые официально заявила о том, что у нее есть стратегия развития наноэлектронной 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 наноэлектроники, – 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 наноэлектроники, и, конечно, методам дешевого массового производства наноэлектронных 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 наноэлектронике 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

[1] 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^2, в то время как самые «сверхплотные» чипы памяти характеризуются емкостью в 1 Гбит/см^2 (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.

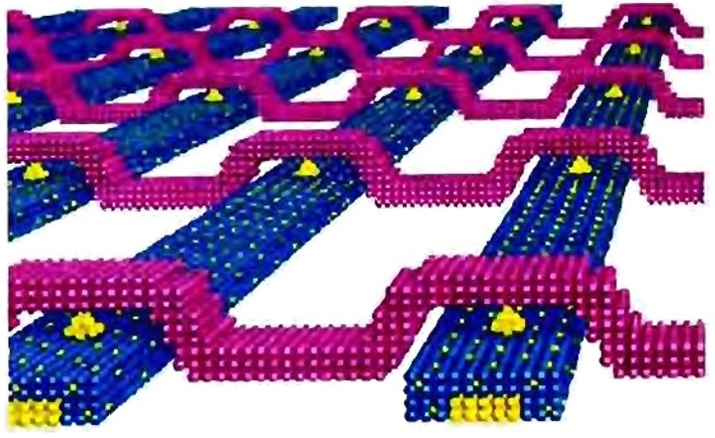


Рис. 2.7. Матрица наноэлектронных ключей

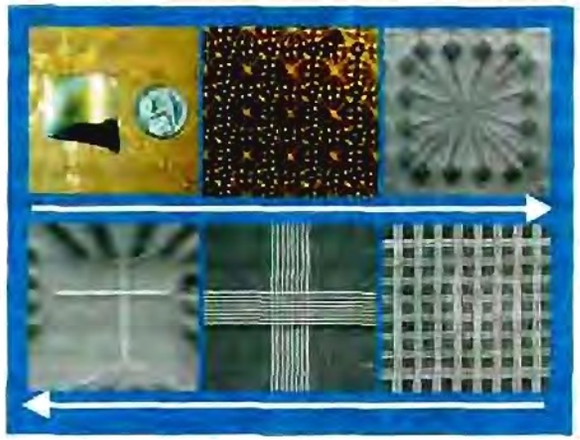


Рис. 2.8. Ранее изготовленный наноэлектронный чип памяти на основе новой архитектуры (стрелками указано увеличение масштаба)

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 наноэлектронных 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 нанокомпьютеры 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 наноэлектроники в HP 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 нанологики[1]

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

В отличие от обычных механоэлектрических переключателей, у наноаналога нет движущихся механических частей. «Перемычка 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 ± 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).

[1] TRN: Nano bridge builds logic.

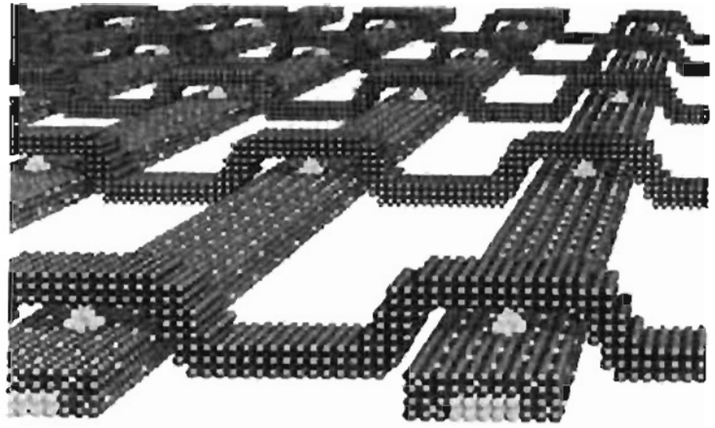


Рис. 2.9. Матрица квантовых наноключей

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/см², в то время как самые сверхплотные чипы памяти характеризуются емкостью в 1 Гбит/см².

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[1]

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 заставлять 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

[1] Nanotechnology-Now: Perm Researchers Take a Big Step Forward in Making Smaller Circuits.

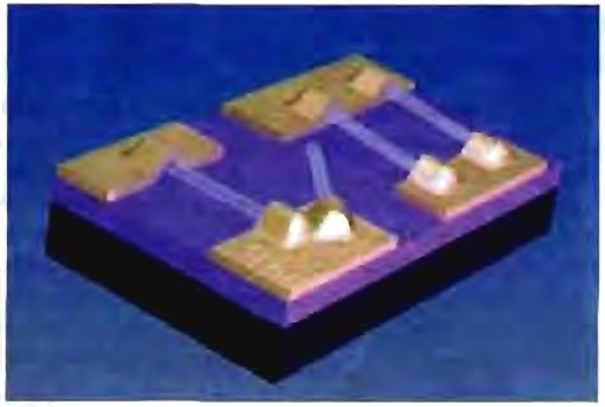


Рис. 2.10. Нанотрубки, нанесенные на чип по новой технологии

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[1]

В арсенале нанотехнологов появилась новая технология производства микро- и наноструктур. Ее предварительное название — печать микросмещением (microdisplacement printing). Она позволяет с высокой точностью наносить на микро- и нанокомпоненты отдельные молекулы. В первую очередь печать микросмещением будет применяться в наноэлектронике, 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 наличия 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.

[1] Nanotech-Now: New Microprinting Technique Improves Nanoscale Fabrication.

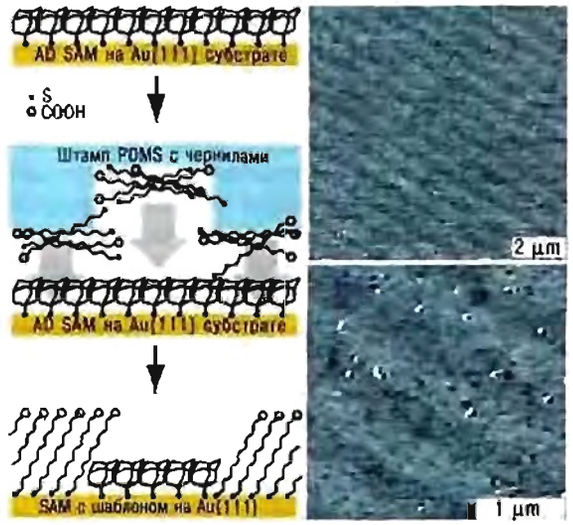


Рис. 2.11. Демонстрация печати микросмещением

«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 наноэлектронике, — 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.[1]

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[2]

В лаборатории квантовых исследований (Quantum Science Research, QSR) компании Hewlett-Packard (HP) разработана новая технология производства наноэлектронных 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 «задвижки-перемычки»), уже сегодня могут использоваться для вычислительных операций в микропроцессорах, т.е. выполнять функции традиционных кремниевых транзисторов. Важнейшее же их отличие 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.

[1] Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 2.

[2] Журнал «Эксперт».

«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 Мориарт: «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 «задвижек-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.

ГЛАВА 3

НАНОДАТЧИКИ И НАНОУСТРОЙСТВА

Проект наномеханического вентиля[1]

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.

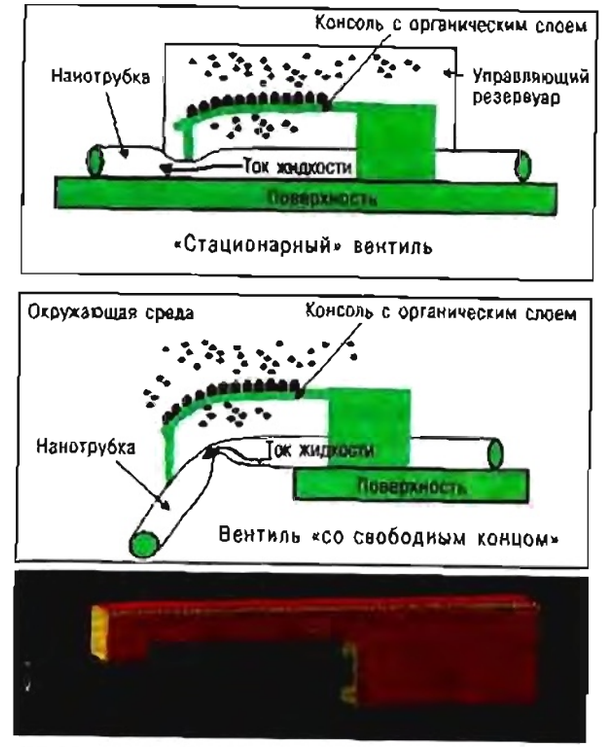


Рис. 3.1. Принцип действия наномеханического вентиля

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 поршни «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.

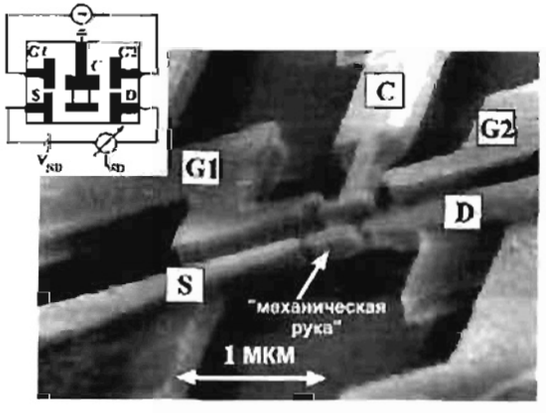


Рис. 3.2. Наномеханический осциллятор Блайка

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 С 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 потерялся 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 магнитную[1]

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.

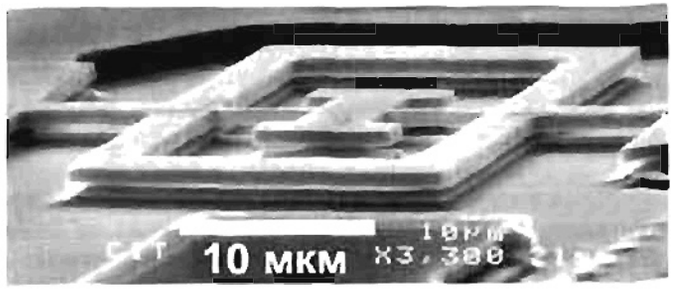


Рис. 3.3. Основа механопамяти – осциллятор

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 превысить 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 НЭМС[1]

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.

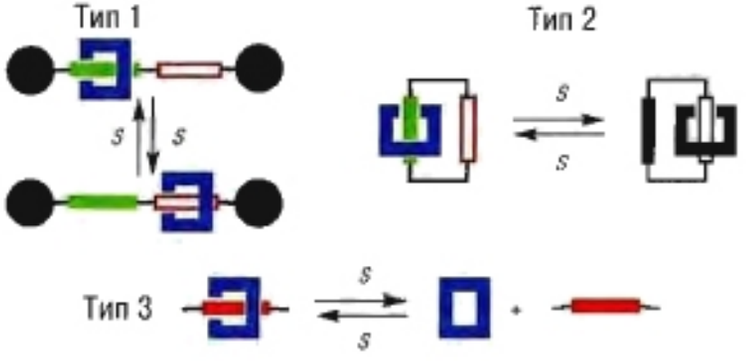


Рис. 3.4. Типы молекулярных элеваторов

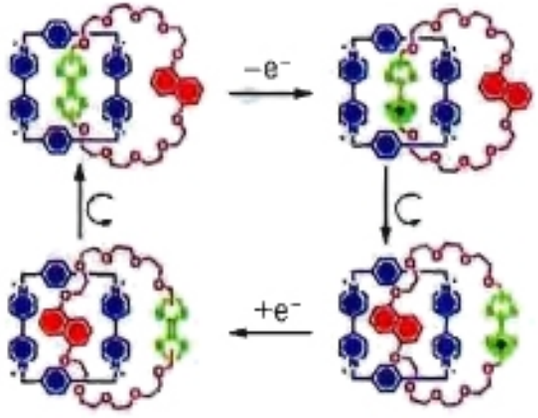


Рис. 3.5. Активация молекул ротаксана и катенана

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.

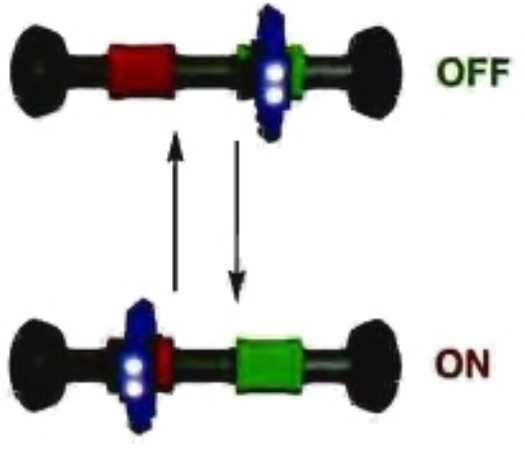


Рис. 3.6. Модель молекулярной памяти на основе молекул ротаксанов

«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 Гб[1]

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).

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.

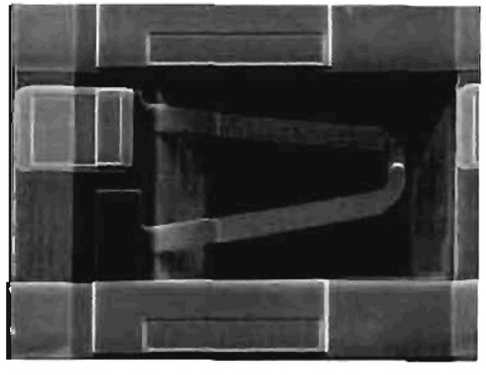


Рис. 3.8. Кантилевер «Многоножки»

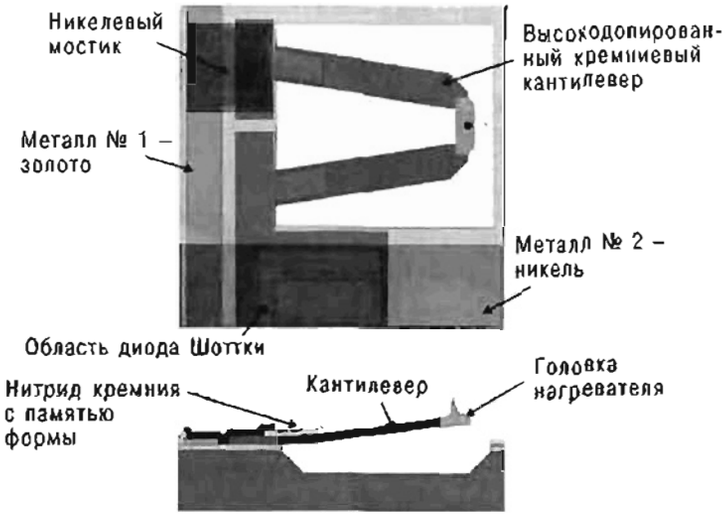


Рис. 3.9. Строение отдельного термомеханического кантилевера

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

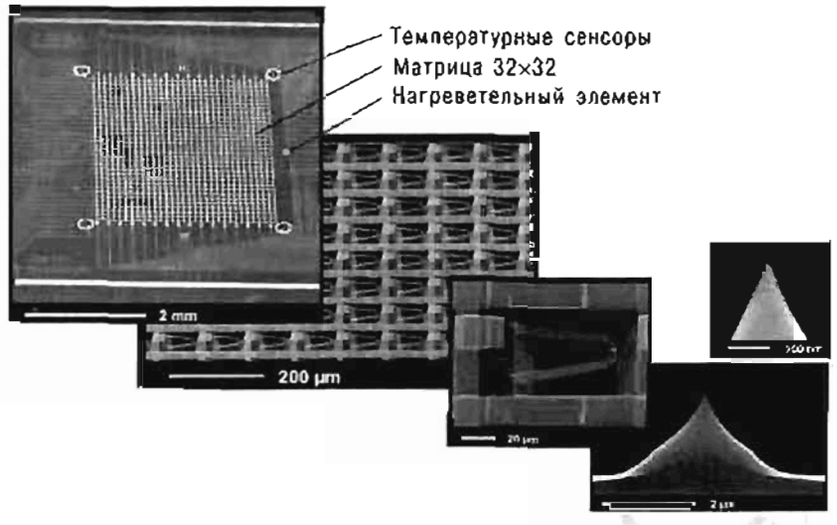


Рис. 3.10. Структура чипа «Многоножки» с 1024 кантилеверами

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 завоюет 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.

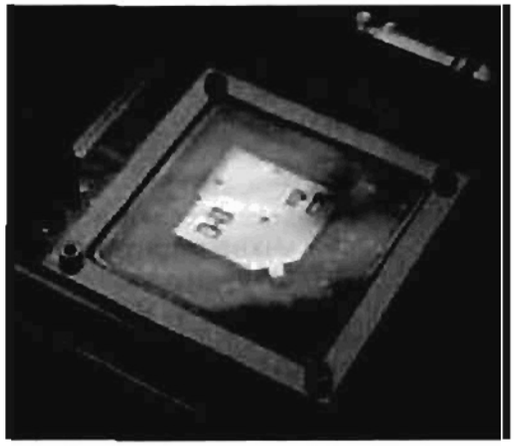


Рис. 3.11. Чип, представленный в Ганновере

Память объемом в 100 Гбайт благодаря нанотехнологиям[1]

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.

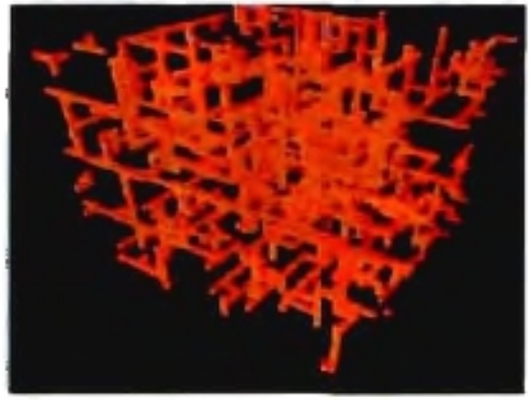


Рис. 3.12. Пример трехмерного чипа по типу нейросети

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 позволяют 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] IXBT: Память объемом в 100 Гбайт благодаря нанотехнологиям!

Магнитная flash-память на основе углеродных нанотрубок[1]

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 sheme 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 Джеком 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 системы[1]

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 3*D*-структуры, полученные с помощью атомно-силовой микроскопии.

[1] Eurek Alert: Open microfluidic and nanofluidic systems.

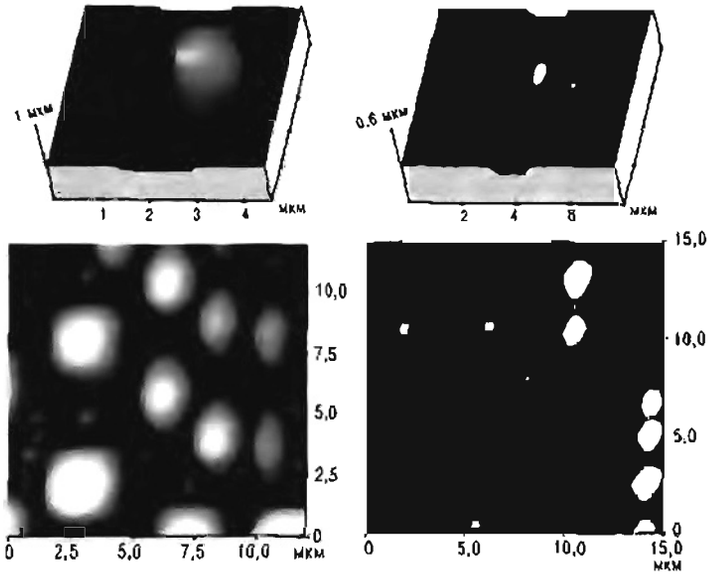


Рис. 3.14. Морфология протекания жидкости по каналам

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 компьютеров[1]

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 наноэлектронных устройствах, позволяющих получить электроэнергию от протекающих биохимических процессов в живых клетках, находящихся *in vitro* (внутри) чипа.

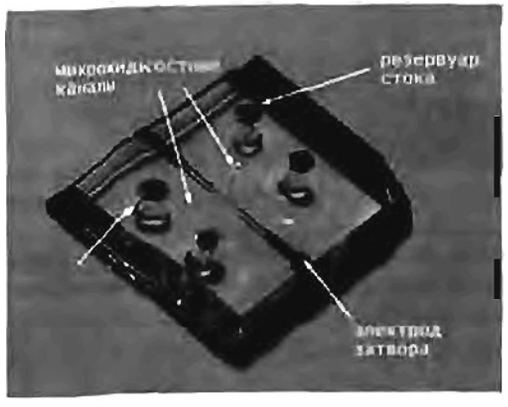


Рис. 3.15. Структура наножидкостного транзистора

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 энзимов. 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).

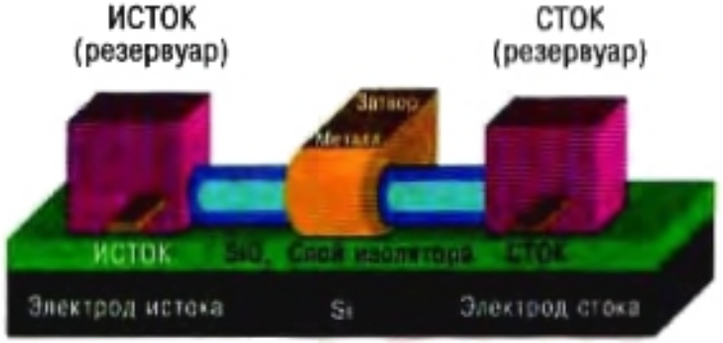


Рис. 3.16. Нанотранзистор с каналом из нанотрубки на кремниевой плате

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 лаборатория-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 энзимы 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 наноэлектронных 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 нанотрубки[1]

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).

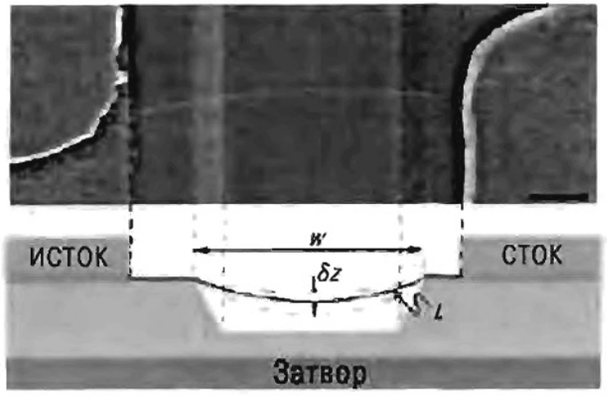


Рис. 3.17. Геометрия устройства и диаграмма расположения нанотрубки на электродах. Масштабная метка — 300 нм

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 наноперемещений[1]

В США создан датчик наноперемещений (рис. 3.19), позволяющий зарегистрировать изменение положения объекта на тысячные доли нанометра. Датчик состоит из наноэлектромеханической перемычки 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.

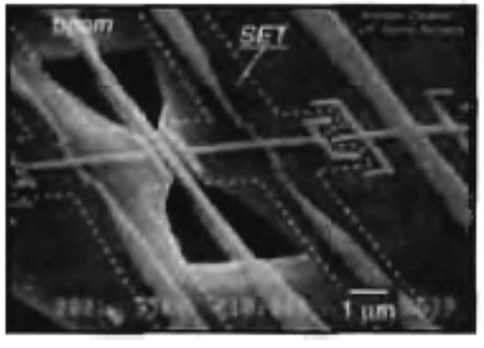


Рис. 3.19. НЭМС-датчик

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 транзистор, 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.

[1] По материалам Physics Web.

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

НЭМС для взвешивания ДНК[1]

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?story id=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 присоединяться 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 нанопропеллер[1]

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 водорода. Золото не взаимодействует с перекисью, а лопасти пропеллера присоединены к валу золотым концом. А никель выступает в роли катализатора, помогая пероксиду 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.

[1] BBC: Nano-Propellers sent for a spin.

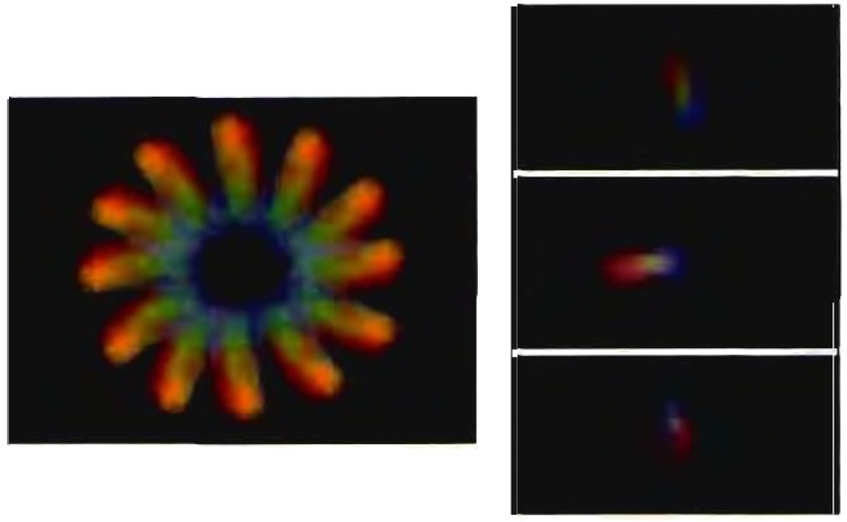


Рис. 3.20. Структура наноротора и положение лопастей в разные моменты времени

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 наномашинах, 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 натяжения[1]

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.

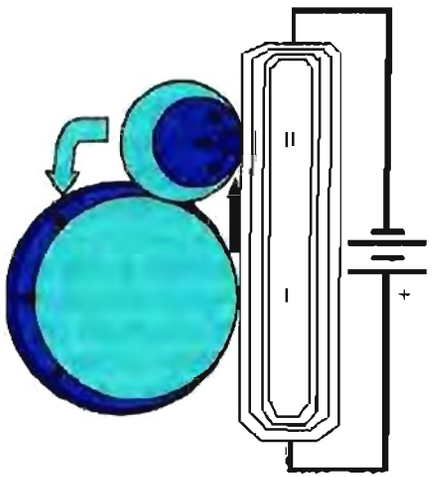


Рис. 3.21. Принцип действия наномотора

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.

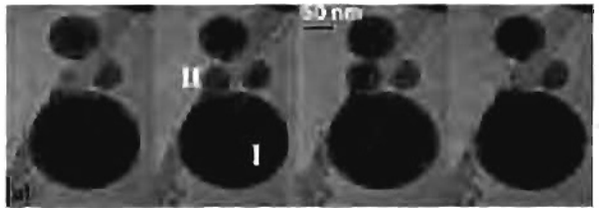


Рис. 3.22. Микрофотографии наноэлектромеханического осциллятора

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.

Газовый наносенсор на основе проводящего полимера[1]

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.

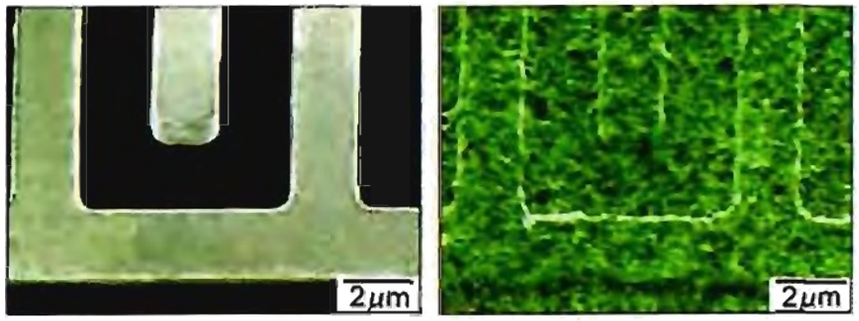


Рис. 3.23. На микрофотографиях, полученных со сканирующего электронного микроскопа (СТМ), видны основные элементы сенсора: микронагревательный элемент (слева) и расположение на сенсоре губчатого полианилинового покрытия, захватывающего молекулы газов (справа)

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

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

«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.

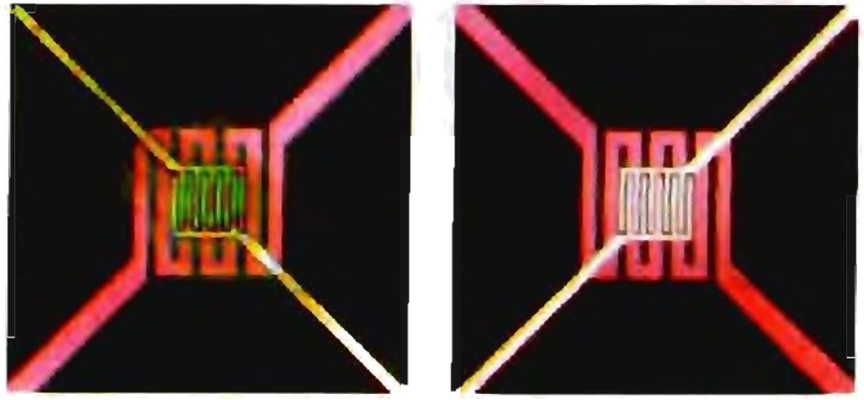


Рис. 3.24. Фотографии двух наносенсоров, изготовленных исследователями из NIST. Каждое устройство 100 мкм в длину. Слева микронагреватель покрыт проводящим полимером – полианилином (зеленого цвета), а справа – такой же нагреватель без покрытия

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 нанотурбина[1]

Как мы уже говорили, наноактюатор – один из основных компонентов наномашин, наноманипуляторов и нанокомпьютеров. 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.

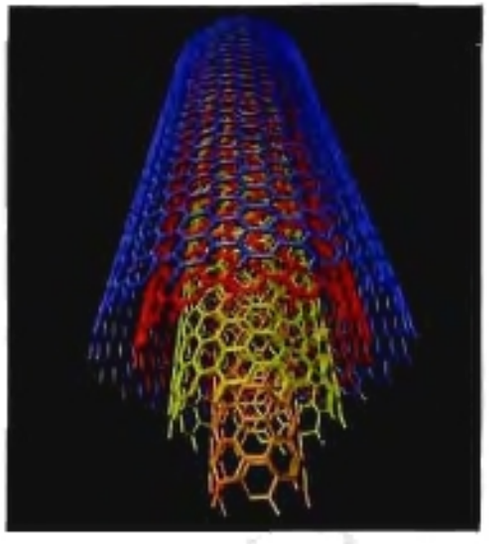


Рис. 3.25. Структура многослойной нанотрубки

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 провернуть, то она возвращается в прежнее положение благодаря силам электростатики. Но при этом она двигается 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 осциллирования нанотрубки-насоса можно управлять (например, подав напряжение на нанотрубку), то, соответственно, можно заставить работать турбину с различной скоростью (рис. 3.26). Так исследователи хотят создать и насос, и актюатор.

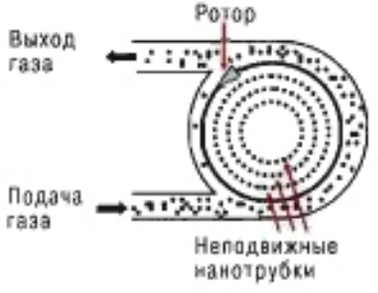


Рис. 3.26. Принцип работы газовой нанотурбины

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.

Продукты нанотехнологий завоевывают мировой рынок[1]

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.

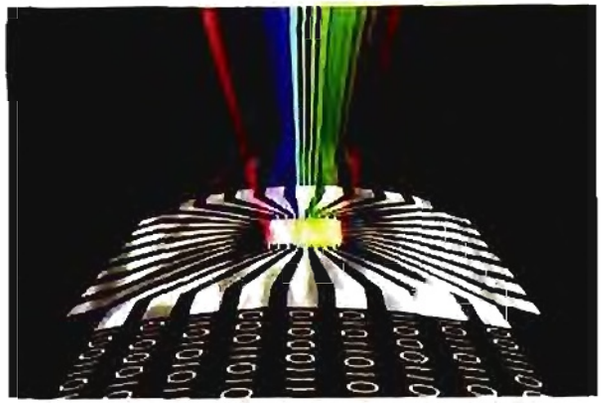


Рис. 3.27. Работа фотонного сенсора от NANOIDENT

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 PET-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 рынке[1]

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.

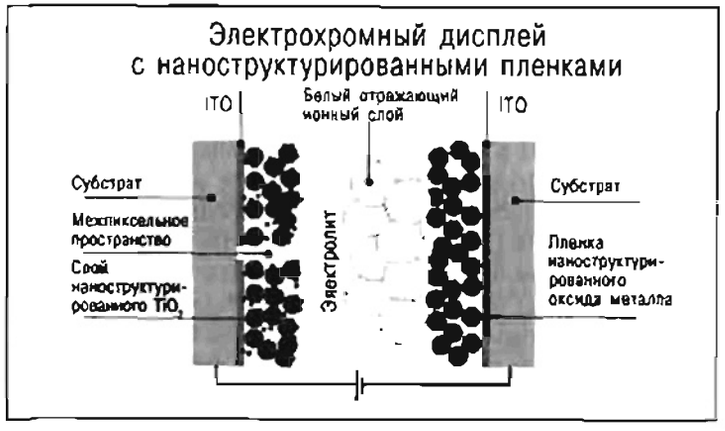


Рис. 3.29. Принцип действия дисплея NCD

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°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 больший 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

Как и его аналог от NanoChromics, 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 NanoChromics 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 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.

Первый цветной дисплей на нанотрубках от компании Motorola[1]

Дисплеи на нанотрубках и OLED-технологиях достаточно близко подошли к выходу на мировой рынок. И недивно 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 плоскопанельных 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 оси[1]

Нидерландские исследователи детально изучили механизм высвобождения вращающего момента, присутствующего в молекуле ДНК на молекулярном уровне, который активируется энзимом – топоизомеразой IB. 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 IB, 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 IB 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 France[1]

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.

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 Zyvex. Специальный композит формирует из нанотрубок пространственную сетку-матрицу, благодаря которой достигается столь большая жесткость при небольшой массе материала.

Вклад компании Zyvex заключается в том, что она разработала состав, позволяющий модифицировать поверхность углеродных нанотрубок таким образом, чтобы они легко входили в состав композита-наполнителя, образовывающего 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.

ГЛАВА 4

ДИАГНОСТИКА НАНОСТРУКТУР И НАНОМАТЕРИАЛОВ

Новые суперлинзы – база будущей оптоэлектроники[1]

Группа ученых из Калифорнийского университета Беркли создали суперлинзы (рис. 4.1), которые могут преодолеть ограничивающий дифракционный диапазон микроскопов, работающих на обычной световой оптике. С помощью тонкой серебряной фольги и ультрафиолетового света исследователи смогли получить изображения с разрешением около 60 нм матрицы нанопроводников и начертание слова «NANO», нанесенное на органическом полимере (рис. 4.2), в то время как дифракционный предел разрешения обычных оптических микроскопов – 400 нм.

О своем открытии ученые сообщили в апрельском выпуске журнала Science. Благодаря этому открытию исследования в области нанотехнологий и конструирование наномашин станут более легкими и удобными, а главное – дешевыми. Также развитие этой технологии может по-

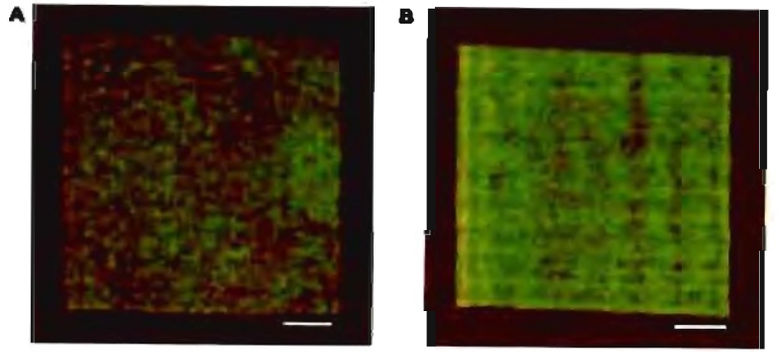


Рис. 4.1. Микроскопия с помощью серебряных суперлинз. Видно различие в разрешении, с которым были получены изображения (слева – 60 нм, справа – 321 нм). Масштабная метка для обоих изображений размером 2 мкм

[1] University of California – Berkeley: New superlens opens door to nanos-cale optical imaging, high-density optoelectronics (http://www. berkeley.edu/).

Рис. 4.2. На верхнем рисунке (A) видно слово «NANO», а ниже (B) суперлинзы были убраны. Разрешение полученного изображения – 60 нм (рис. A). Без суперлинзы разрешение составило 321 нм (рис. B). Масштабная метка для обоих изображений размером 2 мкм

служить базой для расширения емкости DVD-дисков. Как предполагают ученые, на таком сверхъемком DVD-диске можно будет хранить всю Библиотеку Конгресса США, а это уже действительно фантастическая емкость для 12-сантиметрового диска. «Наша работа в первую очередь затронет область хранения данных на DVD-дисках. Но кроме хранения информации можно будет использовать принцип суперлинз в биологической микроскопии и инструментах для нанотехнологов», – комментирует результаты своей работы Ксианг Жанг, профессор университета в Беркли.

Никола Фанг, один из коллег Жанга, предполагает, что суперлинзы пригодятся в первую очередь для оптической микроскопии в медицине и биологии. С помощью современных оптических микроскопов ученые могут увидеть только такие крупные компоненты клетки, как митохондрии и ядро. Н. Фанг утверждает, что с суперлинзовой микроскопией ученые смогут наблюдать за движением белков вдоль микротрубок цитоскелета. С помощью сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии сегодня можно разглядеть объекты размерами в несколько атомов. Но для получения таких изображений потребуется много времени, так как эти виды микроскопии ограничены по перемещениям зондов, сканирующих поверхность. Также с их помощью нельзя изучить живой образец клетки, поскольку препараты для СТМ и АСМ нужно специально подготавливать.

«Главное преимущество оптической микроскопии состоит в том, что мы видим изображение живого образца в реальном времени, – говорит Фанг. – Вот почему с помощью суперлинз можно будет исследовать действующие биологические наносистемы и пытаться конструировать их. А биологи смогут лучше разобраться в природе различных заболеваний».

Открытие суперлинз положило конец дебатам физиков и инженеров о том, как можно обойти дифракционный барьер. Обычные оптические линзы, сделанные человеком или существующие в природе (капли воды, прозрачные кристаллы и т.п.), передают изображение от световых волн, отражающихся от рассматриваемой поверхности.

Предельную разрешающую способность микроскопа часто называют дифракционным пределом, поскольку она определяется явлениями дифракции на входном зрачке. Правда, до открытия суперлинз уже удавалось с помощью ряда остроумных ухищрений «заглянуть» несколько дальше этого предела: это метод, основанный на применении иммерсионных систем (в котором пространство между предметом и объективом заполняется специальными средами) и позволяющий повысить разрешающую способность примерно в 1,5 раза; метод темного поля, основанный на явлении рассеяния света на малых частицах и позволяющий регистрировать наличие сверхмалых частиц, когда их размеры лежат за пределом разрешающей способности микроскопа; метод фазового контраста, с помощью которого можно изучать полностью прозрачные объекты.

Пользуясь современным языком теории информации, можно сказать, что за попытку проникнуть за дифракционный предел приходится платить ценой потери информации о деталях изучаемого объекта. Действительно, методы субмикроскопии позволяют судить лишь о наличии микрообъектов в поле зрения микроскопа, но не об их форме и других деталях.

Весьма заметный качественный скачок в методах микроскопии был сделан физиками, которые стали использовать инфракрасное, ультрафиолетовое и другие не видимые для глаза излучения. Применение этих излучений для освещения объектов наблюдения было связано с их способностью поглощать, отражать, пропускать и преломлять падающее на них излучение. Поэтому, вообще говоря, при использовании излучений различных участков спектра эти объекты выглядят по-разному. Следовательно, подбирая соответствующее освещение, можно получить новую информацию о предмете, так как характеристики поглощения, отражения, пропускания и преломления реальных неорганических и органических веществ зависят от длины волны. Короче говоря, получить 100-процентное изображение без потерь информации невозможно даже с применением «невидимых» лучей.

Все приборы, использующие не видимые глазом излучения, состоят из осветителя (источника освещения), оптических элементов (линз, зеркал, призм и т.п.), пригодных для работ в данном участке спектра, и элементов, преобразующих «невидимое изображение» в видимое. Прорыв в системах «невидимой» микроскопии состоит в том, что ученые из Беркли смогли ввести в конструкцию таких микроскопов новый элемент – суперлинзу из пленки серебра.

В 2000 г. британский физик Джон Пендри сделал теоретическое предположение, что «невидимые» лучи можно захватить и сфокусировать материалом с отрицательным коэффициентом преломления. До него 30 лет назад такое же предположение сделал русский физик Виктор Веселаго. Однако физики до сих пор сомневались в том, что такой материал может вообще существовать. Как известно из основ оптики, коэффициент преломления может быть только положительным. Теории Веселаго и Пендри базируются на том, что электромагнитные световые волны, попадая на поверхность с отрицательным коэффициентом преломления, возбуждают коллективную поверхностную волну, или электронные колебания, называемые поверхностными плазмонами. В результате и происходит захват и фокусировка «невидимых лучей». С тех пор исследователи пытались получить эффект отрицательного коэффициента преломления, используя различные виды волн.

В 2003 г. группа Жанга была первой, доказавшей, что «невидимые» лучи можно фокусировать суперлинзами из серебра. Затем команда Жанга улучшила технику Е/У-микроскопии до того, что сейчас можно видеть объекты размерами 60 нм. Длина волны Е/У-света в установке составила 365 нм.

Лабораторная установка конструировалась следующим образом (рис. 4.3). Ширина матрицы нанострун (или, как их еще называют, нанопроводников) составила 40 нм, а слова «NANO» – около 60 нм. В эксперименте эти объекты поместили перед суперлинзой, которая представляла собой пленку из серебра толщиной 35 нм. После суперлинзы исследователи расположили слой полимера-фоторезиста, на котором можно вытравить изображение, сформированное UV-светом. Примечательно то, что эта суперлинза не дает 100-процентного качества изображения. Теперь исследователи будут работать над тем, что-

Рис. 4.3. Принцип действия микроскопа на суперлинзах

бы максимально приблизиться к идеальному качеству. «Мы не получили идеального изображения в нашем эксперименте, – говорит Фанг. – Но одно ясно: наше изображение гораздо лучше и точнее тех, которые мы видим в оптических микроскопах».

Это только начало долгого пути в разработке сверхточных оптических микроскопов и DVD-дисков высокой плотности записи. Но, как сказали ученые, игра стоит свеч. Тем более что проблема дифракционного предела универсальна: используя тот же принцип, можно улучшить современные астрономические приборы до почти фантастической точности.

Оптическая микроскопия для манипулирования нанотрубками[1]

Исследователи из Калифорнийского университета (Риверсайд, США) использовали флуоресцентные квантовые точки для того, чтобы увидеть однослойную нанотрубку с помощью оптической микроскопии. Этот метод можно будет применить для облегчения сборки микро- и наносистемных устройств на основе нанотрубок.

«Исследования, связанные с манипулированием и построением систем из нанотрубок, теперь значительно упростятся, так как для визуализации можно будет использовать обычный оптический микроскоп, – сказал Майри Озка. – Применение оптической микроскопии значительно уменьшит стоимость проведения исследований, так как сейчас для подобных целей используют атомно-силовую и сканирующую электронную микроскопию».

В основе нового метода лежит нанесение на поверхность нанотрубок флуоресцентных квантовых точек на основе нанокристаллов *CdSe-ZnS*.

Нанесенные нанокристаллы флуоресцируют, что можно легко увидеть в обычный оптический микроскоп. Озка и его команда планируют в будущем исследовать полученные нанотрубки с помощью наноманипулятора.

О своей работе исследователи доложили в Nano Letters.

Как «Многоножка» залезла в микроскоп, или Оптическая микроскопия в нанорежиме[2]

Группа исследователей из разных университетов Великобритании получили грант на 3 млн долл. для того, чтобы создать оптический микроскоп, способный работать со структурами размером до 13 нм. Как известно, максимальное разрешение оптических микроскопов связано с длиной волны видимого света. Это значит, что объекты, длина

[1] Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 2.
[2] Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 6.

которых меньше 200 нм, нельзя увидеть с помощью световой микроскопии. Поэтому заявление английских ученых кажется своего рода сенсацией.

На самом деле ученые используют новую технологию, которая представляет собой гибрид устройства «Многоножка» (рис. 4.4) (Millipede), разработанного исследователями из IBM, и сканирующей оптической микроскопии ближнего поля SNOM (scanning near-field optical microscopy). Поэтому новый микроскоп назван Snomilipede (SNON Millipede). Как говорит профессор Грэхем Легетт, новый микроскоп будет универсальным инструментом как в микросистемной технике и электронике, так и в молекулярной биологии и физике твердого тела. Над созданием этого устройства сейчас работают три института Великобритании: Институт Глазго, Институт Манчестера и Институт Ноттингема.

Основа микроскопа – набор атомно-силовых «ножек» устройства Millipede, которые проводят сканирование исследуемой поверхности (рис. 4.5). Команда IBM до сих пор не может определиться, запускать ли новое устройство хранения данных (а «Многоножка» задумывалась именно как молекулярная память) в производство.

SNOM-технология учитывает детекцию отражения света от атомно-силовых кантилеверов «Многоножки». При этом используются современные вычислительные технологии для построения готового изображения.

Ранее Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) продемонстрировал оптический микроскоп, основанный на SNOM-технологии. Тогда предел разрешения составлял 40 нм. В гибридном же устройстве ученые смогут увидеть структуры размерами до 13 нм.

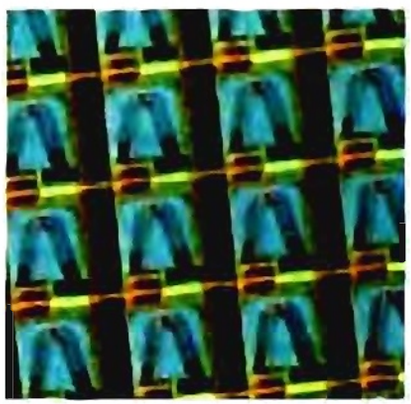


Рис. 4.4. «Многоножка»

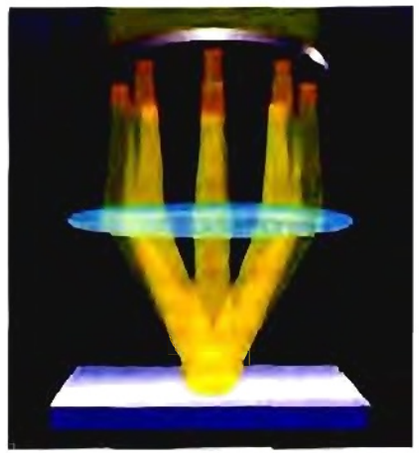


Рис. 4.5. SNOM-микроскопия

Лазерная идентификация материалов[1]

Недорогое решение для идентификации важных документов с помощью лазера было разработано в Imperial College в Лондоне. Метод получил название «Laser Surface Authentication» (LSA). Система сканирует поверхность бумаги, пластика, металла, керамики в целях обнаружения «отпечатка» материала, по которому документ (объект) можно идентифицировать. В результате записывается оригинальный образ, отличительный «отпечаток». Собственно отпечаток получается благодаря микроскопическому «несовершенству» поверхности материала, а это несовершенство участка сканируемой поверхности настолько мало, что его практически невозможно воспроизвести. Так вкратце объясняет суть новой технологии Рассел Кауберн, профессор в области нанотехнологий при Imperial College в Лондоне. «Мы не должны даже как-то изменять сам идентифицируемый (защищаемый) объект – он уже имеет свои уникальные характеристики на своей поверхности».

Лазерное сканирование может быть применимо для таких документов, как паспорта, кредитные карты, ID-карты, музыкальные или DVD-диски, банкноты и пр. Такой подход обеспечивает высокий уровень «встроенной» защиты, при этом он очень дешевый (материал объекта никак не модифицируется) и простой – проще, чем при использовании голограмм и т.п.

В основе метода лежит оптический феномен «лазерного пятна», который возникает при скольжении сфокусированного луча по поверхности, например, бумаги и рассеивается определенным образом, который определяет поверхность материала. Специальный сканер фиксирует отраженный луч.

Такие пятна, как и человеческие отпечатки пальцев, – практически уникальны. Кауберн отмечает, что данный подход позволит снизить случаи мошенничества в большинстве сфер деятельности, поможет в борьбе с терроризмом.

Если использовать лазерное сканирование, скажем, в паспортной системе, то вкратце схема применения такова: прежде чем выдать документ владельцу, поверхность его материала (будь то бумага или пластик) вначале сканируется, считанная информация преобразуется в код, например серийный номер этого документа, и соответственно заносится в базу данных, после чего уже выдается на руки владельцу. Считается, что небольшой участок каждого материала уникален по своей микроструктуре, вследствие чего подделать документ будет практически невозможно, потому что сделать точную копию «кода» документа нельзя.

[1] THE INQUIRER: Laser authentication system may foil ID thieves.

Математическая модель квантовых точек открывает их новые свойства[1]

О квантовых точках сегодня знает большинство молодых ученых и просто интересующихся высокими технологиями. Эти нанокристаллы, состоящие из нескольких сот атомов, могут применяться в квантовых компьютерах и системах медицинской диагностики в качестве маркеров. Оптические и электрические свойства этих наноструктур сильно отличаются от такого же материала в макроскопическом масштабе. Но, как было недавно установлено учеными из Национальной лаборатории в Беркли (США), главнейшие электрические свойства квантовых точек понимались превратно в течение целого десятилетия.

Ученые-теоретики из отдела энергетики Национальной лаборатории в Беркли установили, что диэлектрическая функция квантовых точек, которая показывает, как изменяется заряд наносистемы от наличия внешнего электрического поля, не зависит от ширины запрещенного энергетического слоя квантовой точки, как это предполагали ранее. Наоборот, диэлектрическая функция квантовых точек, находящихся в нано- и микроразмерном диапазоне, практически аналогична функции макроскопических материалов, даже вблизи поверхности квантовой точки (рис 4.6).

«Одно из интересных свойств квантовых точек – то, что значение ширины их запрещенного энергетического слоя намного больше, чем то же в макроскопическом материале. И при этом ее суммарная диэлектрическая постоянная намного меньше. Поэтому логично было предположить, что диэлектрические постоянные зависят от ширины запрещенного энергетического слоя», – объясняет Лин-Вонг Вонг из отделения вычислительных исследований лаборатории в Беркли.

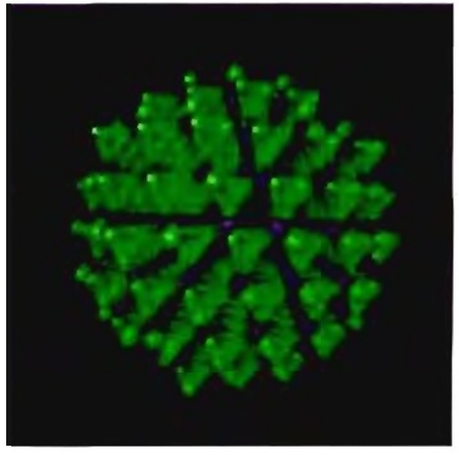


Рис. 4.6. Плотность заряда электронов (показана зеленым) квантовой точки из арсенида галлия, состоящей из 465 атомов

[1] BERKELEY: A New Model of Quantum Dots: Rethinking the Electronics.

Однако недавно французские ученые из Института электроники Норда во главе с Кристофом Делеруа поставили под сомнение это утверждение, бытующее уже несколько лет в области квантовых точек. Они начали проверку взаимосвязи между диэлектрической постоянной и шириной запрещенного энергетического уровня *ab initio* (т.е. заново, начиная с основ). Для расчетов ученые использовали специальную программу расчета механических электронных систем PEtot, написанную Вонгом. Затем ученые провели вычисления на суперкомпьютере Seaborg, расположенном в отделе вычислений энергетики лаборатории Беркли.

Ширина запрещенного энергетического слоя полупроводника – это энергия, необходимая для того, чтобы переместить электрон, находящийся на одном из разрешенных уровней, на пустой разрешенный уровень с другой энергией. Ширина пространства между этими двумя разрешенными уровнями определяется для каждого атома отдельно по законам квантовой механики, и нельзя поместить электрон где-то между разрешенными уровнями. Поэтому пространство между уровнями называется запрещенным энергетическим слоем. Например, фотон, поглощенный атомом, может вытолкнуть электрон на другой разрешенный уровень только в том случае, если у него достаточно энергии для преодоления энергетического потенциала этого уровня. При этом на энергетическом уровне, где был электрон раньше, образуется «дырка» противоположного заряда. И наоборот: если атом испускает фотон, то электрон перемещается на уровень вниз, а фотон имеет энергию, равную энергетическому потенциалу, на который «опустился» электрон. Этот принцип используется в полупроводниковых светодиодах (рис. 4.7).

Рис. 4.7. Изменение ширины запрещенного энергетического слоя приводит к возникновению квантовых точек разного цвета

Каждый полупроводник имеет свои характеристики энергетических уровней. Однако они различаются для материала в макромасштабе и для квантовых точек, сделанных из того же полупроводника. Чем меньше квантовая точка, тем «шире» расстояние между энергетическими уровнями. Для арсенида галлия, например, ширина запрещенного слоя — 1,52 эВ, а у квантовой точки на основе арсенида галлия, состоящей из 933 атомов, — 2,8 эВ, у такой же квантовой точки, состоящей из 465 атомов, — 3,2 эВ. Изменяя размер квантовой точки, можно изменить их цвет, при этом квантовые точки состоят только из того же арсенида галлия.

Используя суперкомпьютер Seaborg, ученые установили распределение электронной плотности квантовой точки в зависимости от ее размера и внешних воздействий (наличия, например, слабого электромагнитного поля от единичного электрона). Для расчетов использовалась аппроксимация локальной плотности. Результаты показали, что данные моделирования хорошо согласовываются с результатами экспериментов, повторно проведенных учеными.

Ученые рассчитали таким образом квантовые точки из 465-атомного арсенида галлия (рис. 4.8) и 465-атомного кремния. Дальнейшие исследования показали, что прямой взаимосвязи между диэлектрической *постоянной квантовой точки и шириной запрещенного слоя нет.* На это также указывает упрощенная математическая модель квантовой точки, составленная учеными. «Для того чтобы установить это, нам понадобились многие часы работы суперкомпьютера, — говорит Вонг. — Мы также составили простую модель расчета диэлектрических характеристик квантовой точки. Мы уверены, что эта модель будет полезна всем исследователям, изучающим квантовые точки и проектирующим наносистемы на их основе».

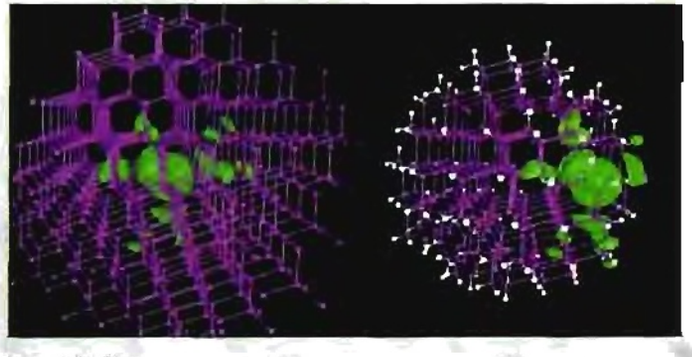


Рис. 4.8. Зеленым изображены изменения электронной плотности, вызванной присутствием одного электрона в макроскопическом арсениде галлия (слева) и в квантовой точке, состоящей из 465 атомов (справа). Как видим, ответная реакция систем схожа

Компания НТ-МДТ вывела на рынок новые DLC-иглы[1]

Недавно компания НТ-МДТ предложила рынку новые суперострые алмазоподобные иглы (Super sharp Diamond-Like Carbon tips — DLC). Такие иглы с типичным радиусом кривизны 1 нм необходимы для получения высокого разрешения на объектах размером в несколько нанометров. Новые DLC-иглы имеют длительное время жизни благодаря высокой износостойкости материала.

DLC-иглы могут быть выращены на любом зонде стандартной серии. Каждая кремниевая игла после процесса выращивания проверяется на РЭМе. Это позволяет отобрать зонды с DLC-иглой, длина которой превосходит другие на 20 нм и более. Иными словами, *одна из игл имеет рабочую длину не менее* чем 20 нм (рис. 4.9).

Рис. 4.9. DLC-игла

Д.В. Клиновым (Институт биоорганической химии РАН) была получена СТМ-картинка ДНК (рис. 4.10) на модифицированном графите (HOPG) с суперразрешением DLC-иглами на модели Solver BIO (NT-MDT Co.). Размер ДНК (2—2,5 нм) почти идентичен реальному размеру ДНК (~2 нм)! Стандартные зонды обеспечивают визуализацию ДНК размером 10—15 нм.

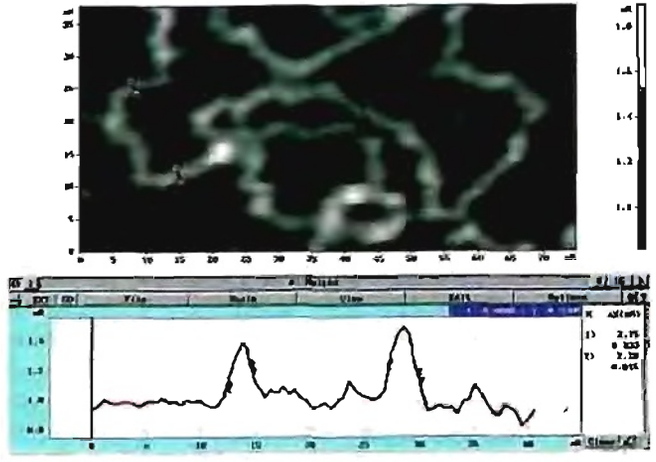


Рис. 4.10. ДНК на модифицированном графите (HOPG)

[1] NT-MDT.

«Невидимое сделать видимым»[1]

На Всемирной выставке «EXPO-2005» в Японии представлен совместный проект Агентства по науке и инновациям и компании NT-MDT 15 апреля 2005 г. Российский космонавт Сергей Крикалев доставил на Международную космическую станцию небольшой прозрачный кристалл с запаянной внутрь кремниевой пластиной с изображением «Моны Лизы». Размер этого изображения 8×8 мкм, и сделано оно методом нанолитографии с помощью оборудования, разработанного компанией NT-MDT (Зондовая нанолаборатория NTEGRA, материал – окись титана на кремниевой подложке). Увидеть это изображение можно только с помощью сканирующего зондового микроскопа. В таком виде «Мона Лиза» представляет совместный проект Агентства по науке и инновациям и компании NT-MDT, названный «Невидимое сделать видимым» и осуществленный художником Георгием Пузенковым. Проект посвящен нанотехнологиям – самой передовой сегодня области науки. Космонавты собираются выпустить мини-«Мону Лизу» в открытый космос.

Сама же картина «Single Mona Liza 1:1» известного художника-постмодерниста Георгия Пузенкова, послужившая прообразом микроизображения, отправлена на Международную космическую станцию с итальянским космонавтом Роберто Виттори в ознаменование 500-летия известного творения великого мастера эпохи Возрождения Леонардо Да Винчи «Мона Лиза». Творчество художника Георгия Пузенкова построено на осмыслении великого культурного наследия прошлого в связи с возможностями, которые дают нам современные технологии.

Кроме того, на Всемирной выставке «EXPO-2005», проходившей с марта по сентябрь 2005 г. в Аити (Япония), в которой участвовали более 120 стран мира, символами российской экспозиции стали скелет мамонта, муляж мамонтенка Димы и «Мона Лиза» Георгия Пузенкова. Компания NT-MDT, представляя Россию на выставке, с успехом демонстрировала свое оборудование, в том числе зондовую нанолабораторию NTEGRA, и конечно, совместный проект с Георгием Пузенковым.

[1] Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 8.

ГЛАВА 5

НАНОБИОТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В МЕДИЦИНЕ

Живое наноожерелье[1]

Междисциплинарное открытие в области нанобиотехнологии сделали исследователи из Университета Калифорнии (США). Команда физиков и биологов разработала новый метод, с помощью которого можно будет производить наноматериалы для различных областей применения. Дальнейшее развитие этого открытия может повлиять на способы доставки лекарств, энзимов и генного материала к органам и отдельным клеткам. Открытие также может служить основой биосенсоров, проводящих нанострун и оптических наноразмерных материалов. О своем исследовании ученые доложили в выпуске вестника Национальной академии наук от 16 ноября 2004 г.

Открытие произошло благодаря сотрудничеству ученых Цируса Сафиньи, профессора в области материаловедения и физики, и Лесли Уильсона, профессора биохимии.

В своих экспериментах исследователи работали с микротрубками из тканей мозга коровы для того, чтобы понять, какие механизмы заставляют их формировать различные трехмерные образования. Микротрубки – полые цилиндры нанометровых размеров, входящие в состав цитоскелета клетки. В живой клетке микротрубки выполняют ряд полезных функций: от транспорта веществ внутри клетки до участия в ее делении. В нейронах микротрубки осуществляют транспорт нейротрансмиттеров. Нейротрансмиттеры – это молекулы, которые либо возбуждают, либо тормозят передачу нервных импульсов по нервной системе. Механизм сборки микротрубок в различные формации внутри клетки пока непонятен.

В представленной исследователями статье было описано открытие нового механизма самоорганизации микротрубок. Положительно заряженные линейные молекулы микротрубок формировали плотные гексагональные группы. При этом исследователи заранее знали, какие структуры будут формировать микротрубки. Но неожиданно оказалось, что в присутствии двухвалентных катионов микротрубки собирались в структуру, напоминающую ожерелье (рис. 5.1).

[1] Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 2.

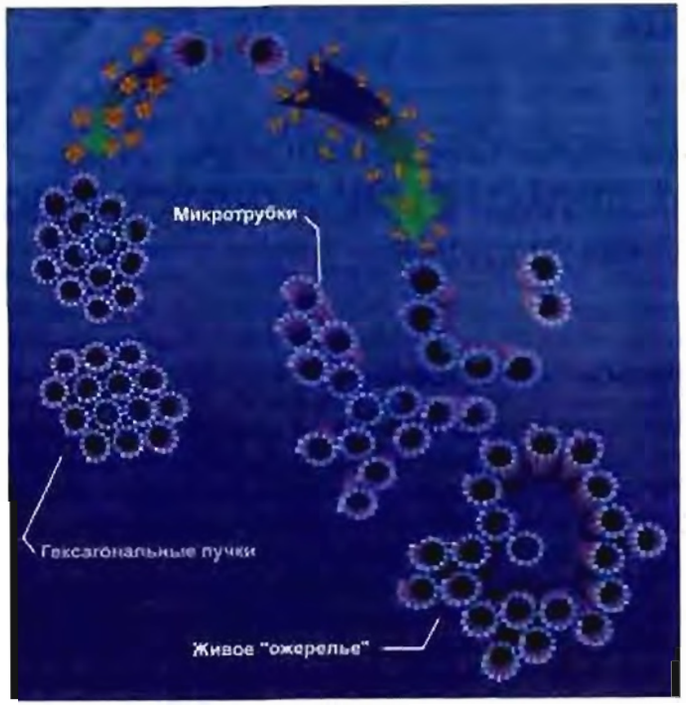


Рис. 5.1. Схематическое изображение самосборки микротрубок нанометрового размера

Сафинья и Уильсон пояснили, что полученное «живое ожерелье» – новый экспериментальный тип мембраны, в которой длинные микротрубки ориентированы в одном направлении и могут проникнуть через клеточную мембрану обыкновенной животной клетки. Ученые также отметили, что «ожерелье» очень динамично изменяет свою форму при повышении температуры. Поэтому его и назвали живым.

Исследователи видят возможности применения как для гексагонального пучка микротрубок, так и для живого «ожерелья». Металлизируя гексагональные структуры, например, можно получить материалы с изменяемыми оптическими параметрами.

Более интересное применение ожидает «ожерелье». Заключенный в двуслойную липидную мембрану набор микротрубок может нести внутри лекарство. А так как микротрубки являются одним из компонентов живой клетки, то доставка лекарств внутрь отдельных клеток будет наиболее быстрой.

Ученые смогли провести это исследование благодаря новой рентгеновской технологии, совмещенной с электронно-лучевой и оптической микроскопией.

ДНК-нанопроволока для будущей микроэлектроники[1]

Исследователи из Университета Пэрдью (США) сумели покрыть молекулу ДНК магнитными наночастицами и затем разрезали полученную «ДНК-проволоку» на несколько частей. Как утверждают исследователи, подобный подход может привести к созданию дешевых электронных устройств (в том числе и компьютеров), которые можно будет получать методами самосборки.

Детали открытия были описаны в февральском выпуске журнала Американского химического общества. Молекула ДНК имеет большой отрицательный потенциал, что можно использовать в процессах самосборки для построения из нее различных структур. Если молекулу поместить в раствор, содержащий магнитные наночастицы с положительным зарядом, то они автоматически присоединятся к поверхности ДНК.

На рис. 5.2а показано нанесение на молекулу ДНК магнитных наночастиц оксида железа и выравнивание полученной металлизированной ДНК с помощью технологии, называемой молекулярной гребенчатой фильтрацией. На рис. 5.2б приведена фотография металлизированной молекулы ДНК, полученная с помощью атомно-силового микроскопа. Рисунок принадлежит Purdue University, Weldon School of Biomedical Engineering.

«Ранее исследователи "металлизировали" молекулы ДНК, покрывая их медью, золотом и платиной. Но после подобной "металлизации" им не удавалось разрезать полученную "проволоку" на меньшие фрагменты, используя фермент рестрик-тазу», – говорит один из исследователей, Йозеф Кинселла.

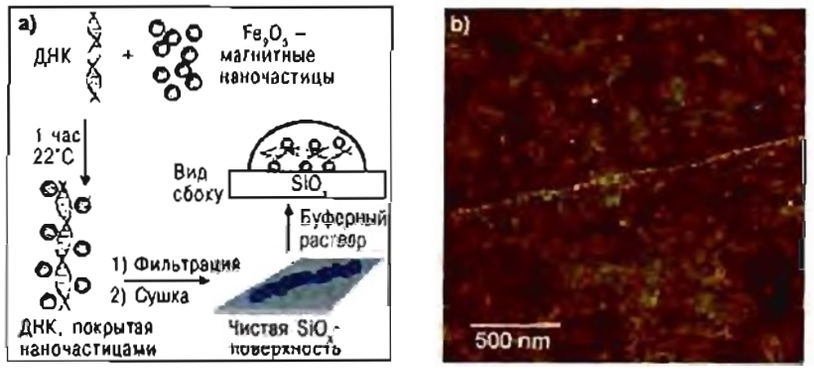


Рис. 5.2. Нанесение на молекулу ДНК магнитных наночастиц оксида железа (а) и фотография металлизированной молекулы ДНК (б)

[1] Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 6.

Так как магнитные компоненты важны в современных технологиях компьютерной памяти, то это открытие позволит «молекулярной электронике» и «ДНК-электронике» выйти на первый план в устройствах хранения данных. А процесс самосборки значительно уменьшит время, затрачиваемое на производство электронных устройств.

Ранее исследователи из университета Пэрдью разработали технологию, благодаря которой можно размещать цепи ДНК на поверхности кремниевого чипа. А работа по металлизации ДНК – следующий шаг в построении наноэлектронных кремниевых устройств.

Наночастицы, которые применил Кинселла в своей работе, представляют собой керамический оксид железа. Диаметр наночастиц – около 4 нм.

После обработки ДНК наночастицами исследователи разрезали полученную «проволоку» энзимом-рестриктазой BamH. Он разрезает ДНК в последовательности нуклеотидов ГГАТЦЦ. Это, конечно, результат, полученный с применением только одного типа энзима-рестриктазы. Если обрабатывать нанопроволоку большим числом рестриктаз, то можно добиться получения проводящих отрезков различной длины.

Сначала исследователи не были уверены, что энзим-рестриктаза правильно воспримет нанопроволоку в первую очередь как ДНК. Но, как оказалось, наночастицы не повлияли на процесс рестрикции.

«Полученная цепь ДНК была сперва растянута на подложке из оксида кремния. Длина этой "заготовки" составила 35 мкм, а ширина – всего 2 нм, – говорит Кинселла. – Затем мы покрыли ее наночастицами и разрезали энзимом на части. Это было похоже на обычный производственный процесс, который имеет место в микроэлектронной промышленности, только мы брали за основу молекулу ДНК».

В своих будущих работах исследователи надеются изучить электрические характеристики полученной нанопроволоки.

Микроорганизмы синтезируют проводящие нанонити[1]

Команда исследователей из Массачусетского университета в Амхерсте открыла электропроводящие органические структуры. Это достижение позволит разработать методы очистки сточных вод микроорганизмами и попутно вырабатывать электроэнергию.

Исследователи-микробиологи открыли нитчатую структуру, названную ими «микробный нанопроводник», которую формируют микроорганизмы Geobacter. Нанопроводники имеют гладкую структуру и толщину всего 3–5 нм. Длина же их может составлять около 30–50 мкм (рис. 5.3).

[1] Nanotech-Now: Researchers discover microbes produce miniature electrical wires.

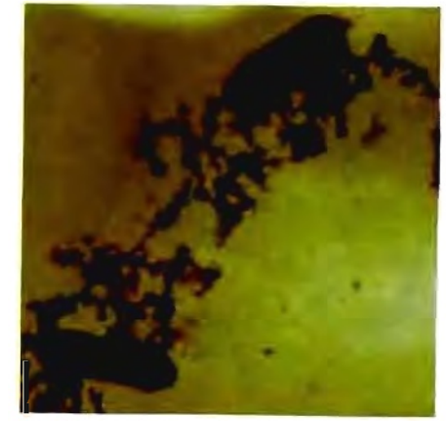


Рис. 5.3. Бактерии формируют проводящую наносеть

«Такие длинные проводящие биологические структуры в биологических системах ранее не встречались, – говорит один из исследователей, доктор Лавли. – Это открытие заставляет нас пересмотреть процессы переноса электронов в микроорганизмах. Может быть, нанопроводники, сформированные с помощью микроорганизмов, станут основой многих сверхмалых микроэлектронных устройств».

«Микромир все еще не перестает удивлять нас», – говорит доктор Аристид Патрино из Департамента энергетики США. Эта организация финансирует все исследования, проводимые в области использования микроорганизмов Geobacter для очистки сточных вод и производства электроэнергии.

«Эти удивительные биологические наноструктуры можно заставить работать на пользу человечеству. Представьте себе мини-реакторы, очищающие сточные воды и попутно вырабатывающие электроэнергию. Их также можно использовать в роли сенсоров, определяющих, заражена ли окружающая среда теми или иными опасными веществами», – продолжил Патрино.

Доктор Лавли был первооткрывателем микроорганизма Geobacter в 1987 г. С тех пор прошло много времени, сформировалась нанотехнология как наука и течение в технологии. Стали возможны взаимосвязи между кремниевой электроникой и органической. Поэтому доктор уверен, что недавнее открытие нанонитей, сформированных бактериями, позволит сделать эту взаимосвязь еще прочнее.

Микроорганизм Geobacter неслучайно выбрали на роль живой батарейки. Это один из немногих типов бактерий, которые могут разлагать продукты жизнедеятельности человека, перерабатывать токсичные металлы и нефть, вырабатывая электричество. Однако для того чтобы передавать электроэнергию, бактерии необходимы электроды, связывающие биохимию клетки с внешним потребителем элек-

троэнергии. Для этого, как установили ранее Лавли и его коллеги, бактерия производит с одной стороны мембраны тонкие нанопроводники, названные пилиями. Это открытие было подтверждено другой группой ученых во главе с микробиологом Гемма Ругера и физиком Марком Туомином: они произвели контактные исследования пилий с помощью атомно-силового микроскопа и установили, что бактерии проводят электроэнергию. Более того, генетически измененные микроорганизмы Geobacter, которые не могут производить пилии, не смогли соответственно проводить электроэнергию и очищать сточные воды.

«Результаты этих исследований показали, что производство электроэнергии и переработка отходов бактериями тесно связаны между собой», – говорит доктор Лавли.

Проводящие пилии и есть те «нанопроводники», которые ученые планируют использовать в наноэлектронике. Для того чтобы бактерии смогли выпускать длинную нанопроволоку, Лавли предлагает использовать генную инженерию.

Другой интересный факт, открытый учеными, – передача электроэнергии от бактерии к бактерии через сеть, сформированную пилиями.

О своих открытиях доктор Лавли и его коллеги сообщили в журнале Nature в статье «Extracellular Electron Transfer Via Microbial Nanowires».

Наноэлектронный прибор на основе одной органической молекулы[1]

В Аризонском государственном университете создали электронный прибор, состоящий из единственной органической молекулы, сообщает Science Daily. По мнению исследователей, их результат указывает на возможность привлечения биофизических исследований к проблемам наноэлектроники.

Анилиновые гепто-олигомеры принадлежат как раз к таким соединениям, которые могут проводить электричество и работать как электронные ключи. Однако до сих пор это не было проверено экспериментально.

Цепочка из семи анилиновых фрагментов (рис. 5.4) ведет себя как резистор с отрицательным дифференциальным сопротивлением, т.е. в некотором диапазоне напряжений уменьшению силы тока отвечает рост разности потенциалов. Таким свойством обладают некоторые полупроводниковые диоды, употребляемые в «макроскопических» приборах с середины 1960-х годов.

[1] Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 6.

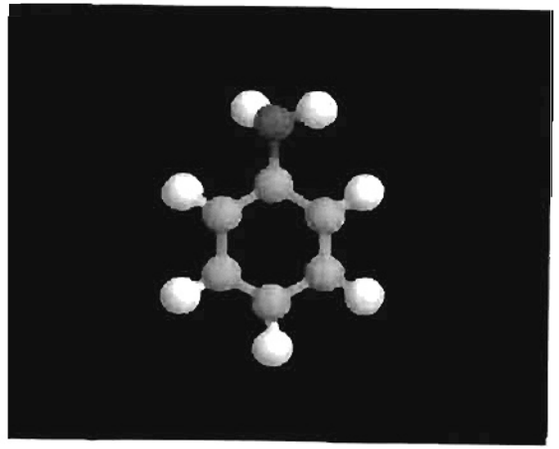


Рис. 5.4. Молекула анилина

Биофизик Стюарт Линдсей воспользовался известной способностью многих ароматических соединений к переносу заряда. Поставленный им эксперимент включал измерение электропроводности раствора, содержащего исследуемое вещество, и косвенную оценку собственного сопротивления молекулы. О результатах своей работы исследователи доложили 18 февраля 2005 г. на Вашингтонской сессии «Биологические материалы и наносистемы». Линдсей считает, что осуществленная им и соавторами работа – удачный пример молекулярного дизайна, когда синтезируемая впервые молекула обладает заранее предсказанными физическими характеристиками.

Хламидомонада в качестве «грузовика»[1]

Американские ученые из Гарварда «запрягли» зеленые водоросли и заставили их переносить «полезный груз» вверх и вниз по крошечным микроканалам. Зачем это нужно? Как говорят ученые, в будущем клетки водорослей и другие микроорганизмы будут обучены таким образом, чтобы выполнять простейшую механическую работу по перемещению микро- и наноконтейнеров.

В своих экспериментах исследователи использовали одноклеточные зеленые водоросли Chlamydomonas reinhardtii длиной около 10 мкм. Для передвижения они применяют пару жгутиков и плывут подобным брассу стилем. Молекулярный мотор этой водоросли достаточно изучен для того, чтобы знать, как он устроен, но недостаточно для того, чтобы создать его искусственный аналог. Поэтому ученые решили использовать творения природы, а не делать искусственный наномотор.

[1] BBC: Cells made to haul tiny cargoes.

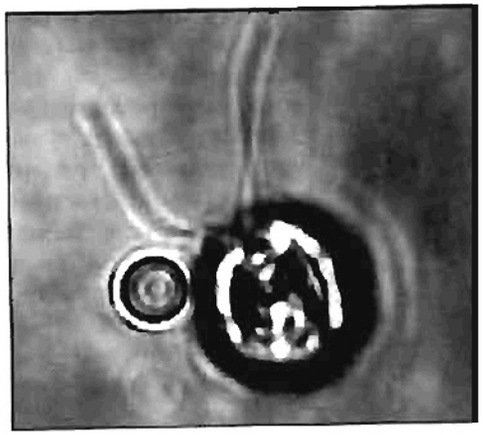


Рис. 5.5. Хламидомонада «везет» бусину полистирола

Посредством химической связи ученые дали водорослям груз – «бусинки» полистирола, а затем, используя свет различной интенсивности, заставили клетки перемещаться по микроканалам тестовых камер (рис. 5.5). Любопытно, что груз никак не повлиял на скорость движения клеток. Чтобы разгрузить водоросли, исследователи подвергали их ультрафиолетовому излучению. Команда исследователей даже придумала новый термин, обозначающий «грузовой» микроорганизм: microoxen, т.е. микробык.

«Мы в основном уже разработали систему перемещения объектов микроорганизмами, – сообщил доктор Дуглас Вейбель. – Теперь мы используем их двигатели для выполнения нетрадиционных задач». По словам ученого, технология найдет применение в молекулярной медицине. Например, груз водоросли представляет собой наноконтейнер, чувствительный к определенным белковым маркерам раковых клеток, или токсинам. И затем клетки помещают в контейнер с тестовой тканью. После путешествия хламидомонад в ткани ученые узнают, содержатся ли те или иные токсины в образце по их грузовым отсекам.

Химики создали «крабовые клешни», захватывающие атомы мышьяка[1]

Химики из Орегонского университета создали молекулярные «клешни», которые захватывают отдельные атомы мышьяка. О своем открытии исследователи сообщили в ноябрьском выпуске журнала Angewandte Chemie International Edition 2004 г.

Даррен Джонсон, специалист в области супрамолекулярной химии, и его коллеги разработали молекулу, способную захватывать и связывать атомы мышьяка. Эти молекулы называются хелаторами (хелатор с греческого – «крабовые клешни»). Молекула хелатора имеет специальную структуру, напоминающую клешни краба. Благодаря такой особой конфигурации и структуре присоединительных мест на поверхности молекулы несколько молекул способны захватывать и удерживать длительное время атом металла. Три молекулы, содержащие в качестве основного элемента серу, связываются с атомами мышьяка, образуя пирамидальную структуру. Ранее мы писали о планируемых молекулярных рецепторах, которые могут захватывать отдельные молекулы. Работа Джонсона и его коллег как нельзя лучше вписывается в развитие будущих нанорецепторов.

«Если усовершенствовать разработанный нами метод, то он пригодится для обнаружения и удаления токсичных металлов из организма человека или окружающей среды», – сказал Джонсон.

Пока что исследователи продемонстрировали, как хелаторы связывают атомы мышьяка в лабораторных условиях. Для того чтобы использовать хелаторы в клинической практике, необходимо разработать эффективный и надежный метод их последующего выведения из организма.

«Сейчас мы стараемся доказать, что наши "крабовые ловушки" первыми нейтрализуют мышьяк, опережая отравление человеческого организма этим металлом», – говорит Джонсон.

Математическое моделирование хелаторов выявило некоторые особенности комплекса, содержащего мышьяк. Исследователи использовали математические методы ab initio для того, чтобы построить оптимальную модель хелатора.

«Сейчас мы работаем над разработкой более стабильных систем по захвату атомов мышьяка. Большинство наших расчетов мы ведем с помощью математического моделирования, что значительно сокращает время, необходимое для нахождения правильного решения», – комментирует работу ученых Джонсон.

Процесс самосборки предполагает соединение нескольких молекул в большую структуру благодаря геометрическим или физико-химическим особенностям собирающихся молекул. В результате этого процесса должно получиться соединение гораздо более стабильное, чем исходные «строительные блоки».

В основе построения модели молекулы хелатора и готового комплекса, содержащего атомы мышьяка, лежали два фундаментальных метода: магниторезонансная спектроскопия и рентгенография. Для определения структуры комплекса в первом приближении использовали магниторезонансное отображение (MRI), которое часто применяется в медицинской диагностике. А для исследования атомарной структуры комплексов пришлось воспользоваться техникой рентгеноструктурного анализа.

Эта первичная фаза работы исследователей финансировалась грантом Орегонского университета.

[1] Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 2.

Наноустройства ловят вирусы[1]

За вирусами охотятся давно. Гарольд Крэйтхед и его коллеги из Корнеллского университета построили в этом году микроскопический кантилевер для того, чтобы взвесить отдельный вирус. В этом месяце Чарльз Либер и его команда из Гарвардского университета создали биочип, который определяет присутствие вируса гриппа. Новый биочип можно использовать как в гражданских целях (использование в медицине), так и в военных (при выявлении следов бактериологического оружия).

Крэйтхед пошел по «механическому пути»: его команда построила наноэлектромеханическое устройство – кантилевер, который может взвешивать объекты массой около 10–18 грамм. Весы состоят из вибрирующего кремниевого кантилевера длиной около 4 мкм и шириной 500 нм (рис. 5.6). Как только частица с малой массой попадает на кантилевер (он-то и представляет собой чашу весов), это изменяет частоту его колебаний. Изменения вибрации измеряются лучом лазера, который направлен на кантилевер. Измерив вибрацию «чаши весов» с «грузом», исследователи могут установить его массу.

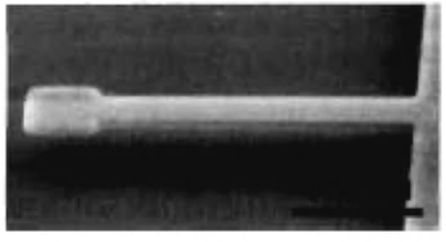


Рис. 5.6. Кремниевые «весы» – НЭМС-кантилевер

Для того чтобы на кантилевер попадали только вирусы, Крэйтхед покрыл его слоем антител, чувствительных к определенному виду вирусов. И когда «весы» поместили в жидкость, содержащую различные вирусы, то один из них прилип к кантилеверу. Так исследователи смогли поймать вирус и взвесить его (Appl. Phys. Lett. 85 2604). «Чувствительность НЭМС достаточно высокая, – сказал Крэйтхед, – можно взвесить очень быстро даже один вирус».

Но это было в начале 2004 г. В конце сентября 2004 г. Либер и его команда на основе матрицы полевых транзисторов, состоящих из нанострун, сконструировали детектор вирусов, покрыв поверхность транзисторов антителами (Proc. Nat. Acad. Sci. 101 14017). Конструкция биочипа такова, что вирусы могут попасть к детекторному блоку через сеть микрожидкостных каналов. Микрожидкостные каналы дальше разветвляются и расположены таким образом, что пересекаются с нанотранзисторами (рис. 5.7).

[1] Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 2.

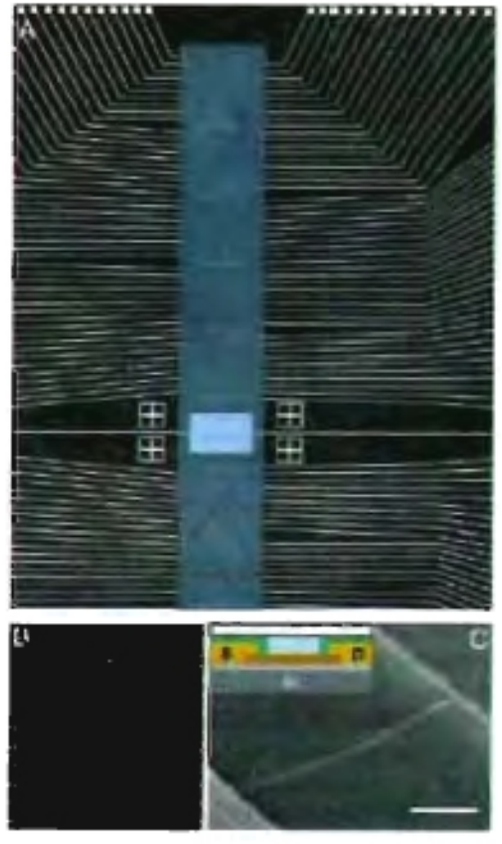


Рис. 5.7. Структура матрицы полевых транзисторов на нанострунах:
A – геомерия расположения нанотранзисторов;
B – участок нанотранзисторов (на A выделен красным прямоугольником);
C – структура отдельной наноструны-транзистора

Наноструны покрыты специальными антителами, которые соединяют определенный вид вируса. Так как в матрице много отдельных нанострун, то детектор может выявлять до 100 различных типов вирусов.

Биочип работает следующим образом: как только вирус попадает на соответствующее ему антитело, то проводимость отдельной наноструны изменяется и, следовательно, изменяется состояние транзистора (рис. 5.8). Это изменение определяют дальнейшие логические цепи, которые в зависимости от номера нанотранзистора (1, 2 или другой) сигнализируют о наличии определенного вируса. Как мы говорили ранее, схема может определять до 100 различных вирусных частиц.

«Высокий коэффициент усиления нанотранзисторов и их чувствительность к присоединению вирусных частиц позволяют делать вывод, что биочип сможет детектировать отдельные органические молекулы», – говорит Либер.

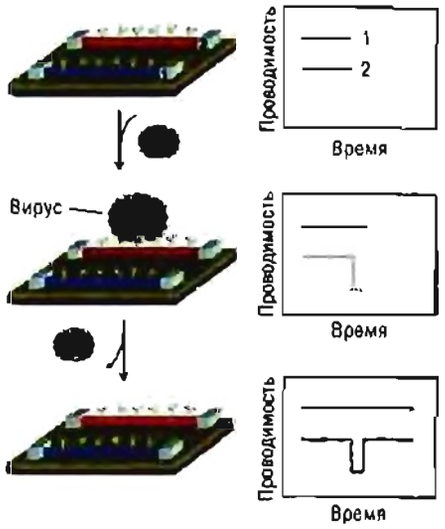


Рис. 5.8. Схема работы биочипа

Исследователи из Гарварда продолжают эксперименты с биочипом для того, чтобы добиться определения нескольких типов вирусов или биомолекул одновременно. Как ни странно, ученые из Корнелла во главе с Крэйгхедом занимаются тем же – строят похожие биочипы.

«Живые» роботы двигаются с помощью мышц[1]

Крошечные роботы, приводимые в движение живыми мышцами, были созданы учеными Калифорнийского университета (Лос-Анджелес). Устройства были сформированы посредством «растущих» клеток крысы на микроскопическом кремниевом кристалле, сообщили исследователи в журнале Nature Materials (рис. 5.9).

Крохотный робот меньше миллиметра длиной может двигаться самостоятельно при добавлении в окружающую среду раствора глюкозы. Эта работа – впечатляющий пример тесного союза биотехнологий и мира нанотехнологий. Исследователи в области нанотехнологий часто обращаются к живой природе для вдохновения. Но профессор Карло Монтеманьо из Калифорнийского университета (Лос-Анджелес) обратился к природе не за идеей, а за реальными исходными материалами. Ранее он создал роторный наномотор из генетически модифицированного белка. Теперь он вырастил мышечную ткань на крохотных «скелетах» роботов.

[1] Cornell: How Cornell scientists uncover and remake molecules of life;
BetterHumans: Miniscule Musclebots Powered by Rat Cells;
SPIE: First self-assembled micro-robots powered by muscle;
New Scientist: First self-assembled micro-robots powered by muscle.

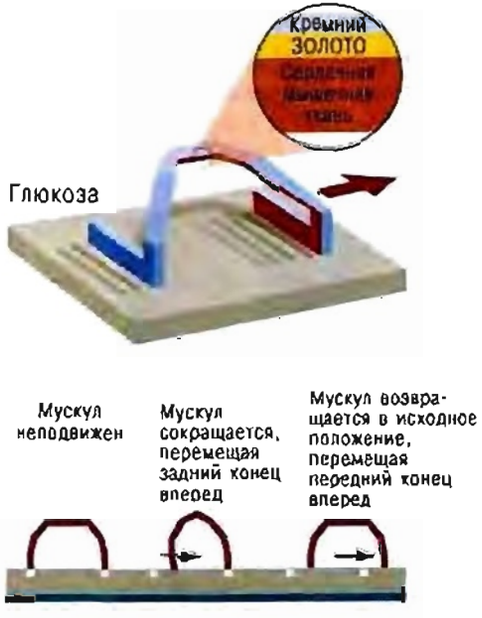


Рис. 5.9. «Живые» машины

Команда Карло Монтеманьо использовала кардиомиоциты (клетки сердца) крысы для создания мельчайших машин, способных двигаться самостоятельно за счет сокращения клеток. Два устройства выглядят как крохотная пара лягушачьих лапок.

«Кости, которые мы используем, на пластмассовой или кремниевой основе, – говорит профессор Монтеманьо. – Итак, мы сделали эту действительно прекрасную конструкцию, способную двигаться и гнуться. Теперь мы имеем устройства из "скелета" и мышц, которые позволяют им двигаться».

Под микроскопом мы можем увидеть крохотных двуногих «биоботов», ползающих по кругу. Профессор Монтеманьо сообщил, что такие мышцы могли бы быть использованы в микроскопических машинах в качестве актюаторов или даже управлять миниатюрными электрическими генераторами, обеспечивая энергией микросхемы.

Но когда живые клетки соединятся с кремнием – будут ли они живыми? «Они абсолютно живые, – заявляет профессор Монтеманьо BBC News. – Я имею в виду, что клетки действительно растут, размножаются. *Так что эти устройства живые*».

Эта идея, вероятно, должна заинтересовать многих, кто уже имеет отношение к нанотехнологиям. Но для Монтеманьо, профессора инженерии, это лишь повод сравнить свои решения с теми, которые уже нашла природа, пройдя миллионы лет эволюции до современных сложных задач в технологии.

ДНК-наномашина производит полимер[1]

Нэд Симэн опять нашел новое применение молекуле ДНК. Теперь с ее помощью ученый создал «фабрику» по производству одного-единственного полимера, повторяющего структуру самой фабрики. Но в будущем подобные наномашины будут производить различные материалы и преобразовывать информацию, изменяя структуру наносистем, состоящих из молекул ДНК. Вполне возможно, что это «счетная» основа будущих ДНК-компьютеров.

«Это первая система-транслятор, основанная на наномеханическом устройстве, — говорит Нэд Симэн. — Она преобразует один тип информации в другой. А возможность управлять структурой материи на атомарном уровне и есть отличительная черта нанотехнологий». Нэд Симэн — исследователь из Нью-Йоркского университета, создающий из молекул ДНК различные структуры, обладающие удивительными свойствами. Он использует эту универсальную молекулу для того, чтобы поставить на поток производство полимеров с заданной структурой.

Размеры нового ДНК-устройства, изготовленного Симэном, составляют всего 110×30×2 нм. Оно состоит из двух ДНК-машин, называемых исследователем PX-JX$_2$ (рис. 5.10). Эти наномашины Симэн изобрел несколько лет назад, скомбинировав определенным образом цепи молекул ДНК.

Симэн и его коллега Шайпинь Ляо добавили цепочки ДНК к каждой стабильной PX-JX$_2$-наномашине. Затем они добавили фрагменты ДНК, связывающие противоположные концы PX-JX$_2$-наномашины. Схему и микрофотографию этого полимера можно видеть на рис. 5.11.

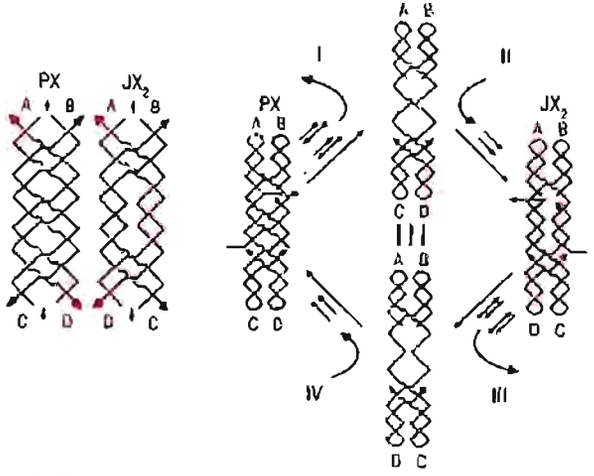


Рис. 5.10. Структура PX-JX$_2$-наномашины

[1] Nanotechweb.org: DNA nanomachine helps build polymers.

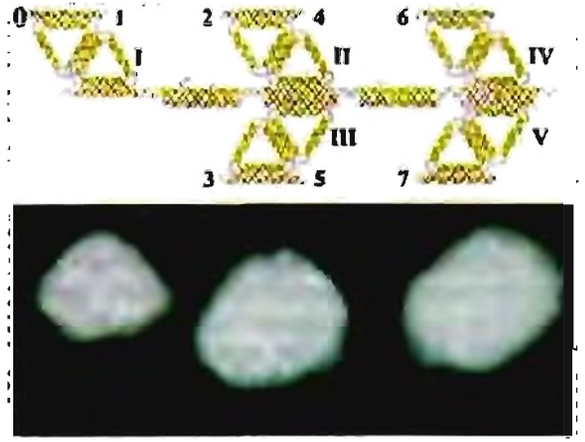


Рис. 5.11. Схема и АСМ-микрофотография синтезированного полимера

Далее Симэн и Ляо заставили эту наномашину работать, добавив в раствор, содержащий ее, фрагменты все той же ДНК. Машина начала собирать из них полимер, повторяющий структуру первоначальной «фабрики». Как утверждает Симэн, с помощью этой системы можно производить различные полимеры, а не только тот, который был получен в эксперименте.

ДНК-наномашина работает подобно информационной РНК, которая управляет синтезом определенной полипептидной цепи в организме. Но в функциях этих наносистем есть и существенные отличия. Устройство Симэна неспособно к транслокации, т.е. конечный продукт будет такой же структуры, что и само устройство. На рис. 5.11 видно, что структура полученного полимера повторяется. Но ученые верят, что им удастся создать ДНК-машину, работающую подобно рибосоме. «Главное применение будущей искусственной рибосомы будет в синтезе новых материалов по заданной последовательности, закодированной в ДНК, — говорит Симэн. — В конце концов мы научимся делать полимеры и новые материалы в больших количествах и за малый промежуток времени благодаря ДНК-машинам».

Приручение таинственных биологических наноконтейнеров[1]

Нанокапсулы, названные наноконтейнерами, часто встречаются в живых клетках. Хотя их открыли двадцать лет назад, до сих пор ученые не смогли понять их назначения, так как не была установлена их роль в клетке. Они не перемещали никаких молекул и не выполняли других функций.

[1] NSF: Vaults: From Biological Mystery to Nanotech Workhorse? (http://www.nsf.gov/discoveries/disc_summ.jsp?cntn_id=104106&org=NSF&from=news).

Исследователи настолько заинтересовались этим феноменом, что генетически модифицировали одну из мышей таким образом, что в ее клетках не содержалось наноконтейнеров. Но лабораторная мышь вела себя точно так же, как и другие, и никаких отклонений в ее развитии и состоянии не обнаружилось. Поэтому ученые удивились: если бы нанокапсулы не были нужны для функционирования клеток, то с течением эволюции они бы атрофировались. А из результатов исследований получается, что они в клетке не выполняют никаких функций. Исследования, проводимые над наноконтейнерами, натолкнули ученых на другую мысль: а что, если использовать эти природные нанокапсулы в нанотехнологиях? Ведь они представляют собой идеальные контейнеры для доставки лекарств, молекул ДНК, РНК; их также можно применять в наноэлектронике — в электронных ключах и микросхемах (рис. 5.12).

Рис. 5.12. Модель наноконтейнера

Наноконтейнеры представляют собой веретенообразные капсулы из белковых молекул. Они внутри полые и не структурированы. Фактически наноконтейнеры — это пустая оболочка, которая должна что-то содержать.

Биохимик Леонард Ром из Калифорнийского университета, под чьим руководством были открыты в 1986 г. наноконтейнеры, в настоящее время составил модель, которая хорошо описывает структуру наноконтейнера. Также биохимик и его команда открыли, как эти нанокапсулы производятся в клетке: для этого необходима определенная цепочка РНК и набор белковых молекул. Также, как утверждает Ром, «теперь, когда мы можем создавать наноконтейнеры, мы будем управлять их свойствами, т.е. можем создать готовую нанокапсулу с грузом и специфическими маркерами на ее поверхности». Если исследователям удастся это сделать, то неминуем прорыв в области точной доставки лекарств.

Наноконтейнеры — отличный кандидат для перевозок медикаментов и фрагментов ДНК, так как они без препятствий проникают через клеточную мембрану и их не атакует иммунная система человека, воспринимая их как «своих». Как выразился Ром, нанокапсулы — «это троянские кони в медицине. Организм считает их своими, в то время как внутри они содержат грузы, которые мы захотим доставить внутрь него».

Первый шаг в приручении наноконтейнеров ученые уже сделали. Они открыли последовательность из 100 аминокислот, которая, как ключом, открывает внешнюю оболочку нанокапсулы, образуя в ней «погрузочное отверстие» (рис. 5.13). Затем исследователи попытались таким образом поместить внутрь наноконтейнера две флуоресцентные метки. Они присоединили их к «ключу» и добавили в раствор с наночастицами. Как и ожидалось, наночастицы «облепили» раковые клетки.

«Это очень и очень хорошее доказательство того, что можно использовать наноконтейнеры в роли "шаттлов" для доставки лекарств непосредственно в живые клетки, — говорит Ром. — Однако нам осталось проверить механизм разгрузки "шаттлов" на живой клетке, а это пока не решенный нами вопрос».

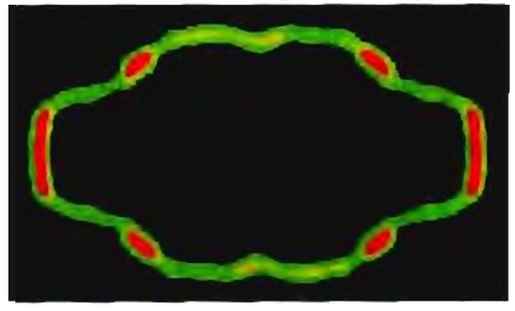


Рис. 5.13. Поперечное сечение наноконтейнера

Но работа исследователей продолжается. Проделав ряд контрольных экспериментов с живыми клетками, Ром и его коллеги добились интересных результатов. Они добавили наношаттлы с флуоресцентными частицами в культуру с живыми клетками, и те тоже начали светиться — груз попал в цель (рис. 5.14).

В дальнейшем ученые попробуют синтезировать наношаттлы со специфичными белковыми маркерами на их поверхности. Это позволит лекарству проникать непосредственно в больные клетки.

Рис. 5.14. Наношаттлы доставили флуоресцентные метки внутрь клетки

Как утверждает Ром, он видит несколько возможных перспектив применения этих наношаттлов в будущем, вот они:

- терапевтическая доставка лекарств, онкология, химиотерапия;
- доставка или замещение энзимов и ферментов, которые вызывают нарушения обмена веществ;
- доставка молекул ДНК для исправления генетических мутаций;
- стабилизация протеинов для увеличения их времени жизни;
- создание биосенсоров, способных отображать состояние отдельной клетки;
- детоксикация клеток и удаление из них вредных веществ;
- очистка окружающей среды от токсичных металлов и опасных биологических объектов;
- наноэлектроника: нанопереключатели, ключи на основе металлов и полупроводников, заключенных в наноконтейнере.

Дендромерные ДНК-наночастицы помогут бороться с раком и другими заболеваниями[1]

Исследователи из Мичиганского университета разработали быстрый и эффективный метод производства лекарств с использованием наночастиц и молекул ДНК.

Ученые взяли за основу молекулы дендромеров — крошечных разветвленных полимеров, концы которых могут присоединять различные молекулы. Таким образом, молекулы дендромеров образовывают различные конструкции, которые могут служить «емкостями» для лекарств.

В ходе экспериментов с соединениями из дендромеров ученые установили, что они хорошо соединяются с молекулами ДНК. При этом молекулы ДНК выступают в качестве «скелета» сложной молекулы, доставляющей лекарство.

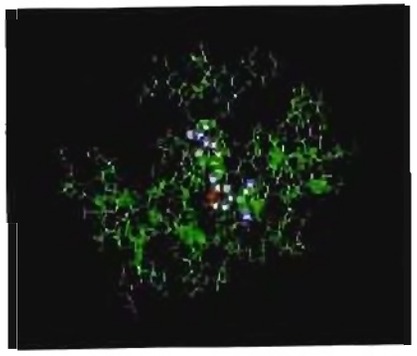


Рис. 5.15. Дендромеры-полимеры, способные связывать другие молекулы

[1] Новости нанотехнологий. Журнал НМСТ. 2005. № 5.

Главные активные компоненты этой наносистемы — дендромеры — могут нести на себе различные молекулы: от лекарства и белковых маркеров до флуоресцентных агентов. В принципе, можно создать дендромер, который бы нес одновременно и маркер, и лекарство, но процесс синтеза такой молекулы очень трудоемок (рис. 5.15).

«Благодаря дендромерам мы можем доставить практически любое лекарство или диагностическое средство в любую клетку», — сказал Джеймс Бэйкер, профессор нанотехнологий и директор Центра бионанотехнологий, образованного при Мичиганском университете.

Наночастицы — идеальное средство для доставки лекарств внутрь клетки. Но до сих пор ученые не могли разместить на них маркеры, позволяющие доставить лечебный груз наночастицы точно в цель — внутрь больной клетки. Да и само производство наночастиц дорого стоит и занимает много времени. Благодаря новой технологии наночастицы смогут стать одним из самых распространенных препаратов для лечения различных заболеваний (рис. 5.16).

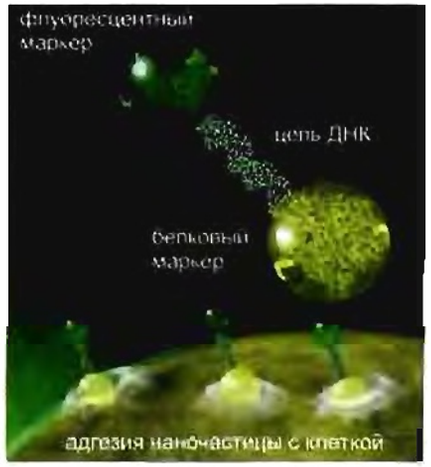


Рис. 5.16. Дендромерная наночастица присоединяется к поверхности раковой клетки

В статье, опубликованной 21 января 2005 г. в институтском журнале «Химия и биология», студент Янгсон Чой описал, как ему удалось синтезировать наночастицу-кластер, состоящую из двух разных дендромеров. Причем одна молекула дендромера предназначалась для поиска больных клеток, а другая содержала лекарство для них. Обе молекулы были связаны цепочкой ДНК, которая играла роль «скелета».

Как утверждают коллеги Чой и Джэймс Бэйкер, полученные наночастицы могут успешно использоваться как при диагностике раковых заболеваний, так и при их последующем лечении. Простой синтез наночастиц и их универсальность позволят сделать этот вид лекарства эффективным и доступным.

В статье Чой рассказал, как он получил наночастицу-кластер. В раствор с двумя различными типами дендромеров он добавил цепочку ДНК длиной 34–66 нуклеотидов. Оказалось, что дендромеры имеют участки, комплементарные нуклеотидам ДНК. Через некоторое время в растворе «собрались» структуры из двух дендромеров, связанных между собой цепочкой ДНК. Один тип молекул дендромеров был флуоресцентный, а другой содержал комплекс маркеров раковых клеток. Полученный раствор кластерных наночастиц представлял собой средство для диагностики раковых опухолей. ДНК-наночастицы прилипали маркерным концом к больной клетке, а по флуоресцирующему концу эти клетки можно было увидеть.

С помощью самых современных средств цитологического анализа исследователи проверили, действительно ли дендромеры прикрепляются маркерным концом к раковым клеткам. Для проверки использовали 3*D*-микроскопы. Результат оказался положительным – большинство наночастиц достигло цели.

«Этот эксперимент подтверждает правильность наших исследований, – сказал Чой. – Сейчас мы работаем над созданием других наночастиц, другой конец которых будет содержать лекарство, а не флуоресцентный агент». А группа Бэйкера составляет библиотеку дендромеров, которые можно будет синтезировать и скомпоновать с молекулой ДНК, используя новую технологию. «Мы сейчас готовим склад кирпичиков ЛЕГО, из которых потом будем составлять лекарства от различных заболеваний», – сказал Бэйкер.

Бэйкер предвидит создание нанокластеров, состоящих из трех цепочек ДНК. Эти «базовые блоки», помещенные в раствор с дендромерами, вызовут самосборку наночастиц, состоящих уже из четырех дендромеров, которые будут выполнять различные функции. Один комплекс наночастицы может нести диагностический агент, другой – маркерный, а третий – лечащий. Такие терапевтические дендромеры могли бы избирательно поставлять пять отдельных лекарств пяти видам клеток. При этом синтез такой супермолекулы по методике Чоя занимает 10 шагов вместо 25, которые необходимо было проделать при использовании прежних технологий.

Углеродные нанотрубки в мозговых имплантатах[1]

Исследователям из Италии удалось вырастить культуру нервных клеток из гиппокампального отдела головного мозга человека на субстрате из сети углеродных нанотрубок. Также учеными было установлено, что сеть из нанотрубок улучшает передачу нервных импульсов

[1] Nanotechweb.org: Carbo nanotubes head for brain repair (http://www.nanotechweb.org/articles/news/4/5/14/1/).

между клетками. Ранее ученым удавалось получить разветвленные сети на основе углеродных нанотрубок. На основании моделей разветвлений нанотрубок ученые надеялись когда-то создать сложные нейросети, которые будут изменять свою структуру и будут пригодны для вычислительной техники или помогут при создании искусственного интеллекта.

Но даже самые смелые ученые не могли предположить, что можно создать подобный гибрид из «нейросетевых нанотрубок» и живых нервных клеток (рис. 5.17). Попытки соединить неживое с живым уже увенчались успехом: интерфейсы кремний – нервная клетка работают в лабораторных условиях и могут передавать сигналы.

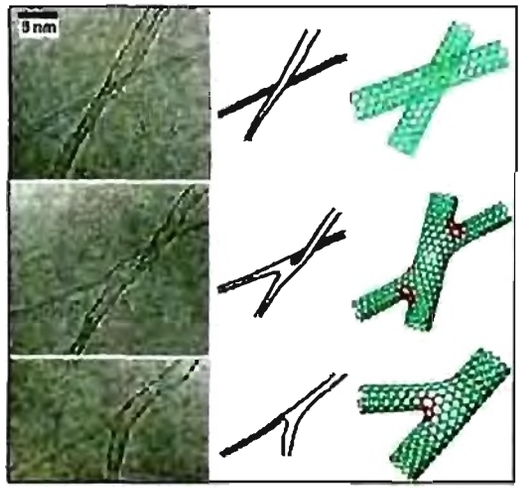


Рис. 5.17. Нейросеть из нанотрубок (модель)

«Идея совместить нанотрубки и нейроны пришла нам почти сразу, как только мы увидели сходство в их морфологии, – говорит Лаура Баллерини, одна из исследователей нейросетей. – Отростки нейронов тоже цилиндричны и напоминают по структуре нанотрубки. Известно, что нанотрубки могут быть и проводниками и полупроводниками электричества, поэтому с их помощью можно соединять отдельные нейроны между собой».

Для того чтобы создать нужный субстрат, по морфологии напоминающий нейросеть, ученые взяли многослойные нанотрубки с функциональными пиролидиновыми группами. Эти химические соединения облегчают растворение нанотрубок в органическом растворителе диметилформамиде. Затем они расположили нанотрубки в случайном порядке на стеклянной поверхности и добавили растворитель. Через некоторое время у исследователей была точная аналогия нейросети, только составленная из углеродных нанотрубок.

Как только искусственная нейросеть из нанотрубок была получена в достаточном количестве, ученые расположили на ней нейроны гиппокампальной области головного мозга, причем для проверки нейроны выращивали отдельно на чистой стеклянной поверхности. Команда наблюдала за ростом нейронов в течение десяти дней. По прошествии этого времени оказалось, что на обоих подложках сформировались почти одинаковые культуры клеток.

За успешным выращиванием нервной ткани последовал период тестов гибрида. Оба образца показали схожие электрофизиологические характеристики: мембранный потенциал, входное сопротивление и емкость. Однако когда дело дошло до измерения постсинаптического тока, то в образце, выросшем на нейросетевых нанотрубках, он распространялся с частотой, в 6 раз большей, чем у культуры, выращенной на простом стекле.

«Нашими исследованиями мы продемонстрировали увеличение скорости распространения нейросигнала благодаря проводящим свойствам субстрата из углеродных нанотрубок, – сказала Баллерини. – В дальнейшем мы будем исследовать новые стратегии тканевой инженерии на основе различных наносистем и наноматериалов. Одна из наших будущих задач – создать такие нейросетевые имплантаты, которые позволят соединять поврежденные нейроны между собой для улучшения передачи сигналов между ними».

Как сказали исследователи, суммируя все то, что им удалось узнать, с помощью новой технологии можно будет получить уже скоро долговременные импланты головного мозга, улучшающие передачу сигналов. Они будут эффективны при лечении заболеваний спинного мозга, хронических заболеваний головного мозга. Также ученые предлагают вводить микроэлектроды в нейросетевой субстрат нанотрубок для миостимуляции поврежденных участков.

Нанотехнологии приносят богатые плоды даже с одного дерева. По сути дела, углеродные нанотрубки – только одна из миллиардов возможных наноструктур, и мы уже сейчас можем видеть, насколько широко используются их возможности: это и нанотранзисторы, и NED-телевизоры, и космический лифт. Теперь к обширному списку применения нанотрубок прибавились имплантаты мозга.

«Умные» нанотрубки в доставке лекарств[1]

Нанотрубки – практически универсальная наносистема. Мы уже видели, как их используют в микро- и наноэлектронике, различных имплантах и протезах, нередко они выступают в роли сенсоров, а отдельные ученые даже собирают из них каркасы для будущих наномашин.

[1] EurekAlert: «Smart» Bio-nanotubes Developed; May Help in Drug Delivery.

Но до сих пор никому не приходило в голову использовать их в доставке лекарств. Обычно для этих целей применяют наночастицы, так как они могут легко проникать через поры в клеточных мембранах и капиллярах.

Правда, это не обычные, уже знакомые нам углеродные нанотрубки, а один из компонентов живых клеток. Это протеиновые нанотрубки-филаменты, входящие в состав более крупных микротрубок, которые клетка использует для транспортировки веществ внутри себя.

Новая терапевтическая система, разработанная учеными из Калифорнийского университета совместно с несколькими цитологическими лабораториями, использует нанотрубки в качестве активных перевозчиков медикаментов. При этом врачи могут контролировать открытие концов нанотрубок таким образом, чтобы они высвобождали целебные грузы в нужном месте. Поэтому ученые назвали протеиново-липидные бионанотрубки «умными».

Кроме медикаментов, нанотрубки могут доставлять в клетки цепочки ДНК, кодирующие определенные гены. Такая адресная генная терапия может помочь в лечении многих генетических заболеваний и рака.

Подобные протеиновые нанотрубки – довольно пластичные наноструктуры, так как двухслойные липидные мембраны могут принимать различную пространственную форму в зависимости от соотношения липид – протеин. Так, нанотрубка может «переключаться» между состояниями «полностью закрыта», «открыт один конец», «открыты оба конца». Внешне нанотрубка может быть и продолговатой, и в виде капсулы.

Организаторы междисциплинарных исследовательских работ, благодаря которым ученые смогли получить уникальные «умные» нанотрубки, – профессор биохимии Калифорнийского университета Лесли Уильсон и профессор материаловедения и физики из того же университета Цирус Сафинья (рис. 5.18).

Микротрубки, сформированные из филаментов-нанотрубок, – одна из основных составляющих цитоскелета клетки. Для того чтобы получить протеиновые нанотрубки, ученые воспользовались тканью головного мозга коровы. В нервных клетках микротрубки также выполняют роль нейротрансмиттера, т.е. передатчика нервных сигналов между клетками.

«Одна из важнейших частей нашего открытия – самосборка протеиновых нанотрубок в смешанном растворе под воздействием электрических зарядов», – комментирует свою работу Сафинья.

Как далее поясняет Уильсон, ученые добились взаимодействия между отрицательно заряженными микротрубками и положительно заряженными липидными мембранами. В растворе, содержащем смесь этих наноструктур, и происходит самосборка «умных» нанотрубок.

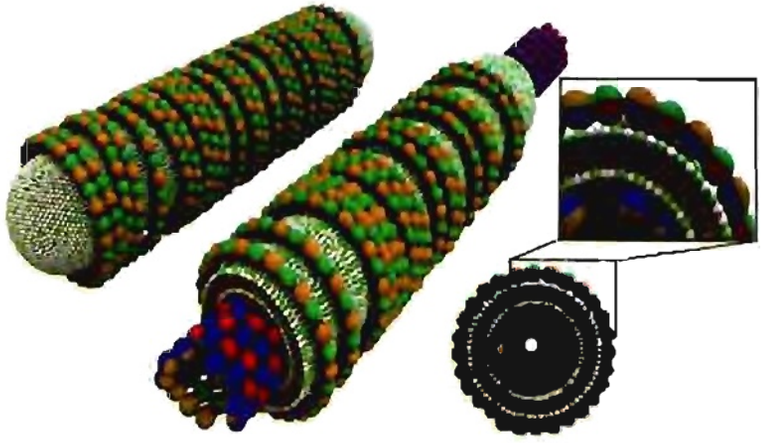


Рис. 5.18. Структура «умных» нанотрубок.
Нанотрубки состоят из белка тубулина (красно-голубо-желто-зеленые объекты), который формирует спирали. Снаружи нанотрубки покрыты двухслойной мембраной (желто-зеленая двухслойная структура). В центре и слева показаны два состояния нанотрубки, зависящие от соотношения липиды – протеин. У центральной нанотрубки оба конца открыты, а у той, что слева, – закрыты

Полученная нанотрубка состоит из трех слоев, и ее общий диаметр составляет около 40 нм, а внутренний диаметр капсулы – 16 нм. Поскольку в растворе, содержащем собранные нанотрубки, со временем формируется равновесие электрических потенциалов, то и капсулы для доставки лекарств будут иметь одну форму. Но если воздействовать на раствор дополнительным электрическим потенциалом, то нанотрубки изменят конфигурацию – откроются или закроются в зависимости от полярности потенциала.

Ученые надеются, что такая пластичная капсула доставки лекарств сможет переносить не только лекарства, но и фрагменты ДНК. В своих опытах Уильсон и его коллеги добились того, что нанотрубки инкапсулировали лекарство «Таксол» и затем по электрическому сигналу освобождали груз.

Одно из преимуществ использования нанотрубок состоит в том, что это естественные образования, находящиеся в каждой клетке, и поэтому они не могут вызвать побочных эффектов или интоксикации.

Структура нанотрубок была изучена с помощью новой технологии рассеивания рентгеновских лучей, совмещенной с электронно-лучевой микроскопией. Исследования финансировались рядом организаций: Национальным институтом здоровья США, Национальным научным обществом и Департаментом энергетики.

Золотые наночастицы могут упростить диагностику раковых опухолей[1]

Американские исследователи из Технологического института Джорджии и Университета Калифорнии разработали новый метод простой и надежной диагностики онкологических заболеваний с помощью золотых нанокапсул. Принцип диагностики основан на связывании наночастиц золота со специфическими антителами на поверхности раковых клеток. При этом наночастицы избегают здоровых клеток, таким образом можно «картографировать» опухоль с точностью до нескольких клеток. О своем исследовании ученые сообщили в журнале Nano Letters.

«Наночастицы золота хорошо рассеивают и поглощают свет, – говорит профессор Мустафа Эль-Сэйед. – Мы хотели посмотреть, можно ли присоединить наночастицы к живым клеткам, чтобы облегчить выявление рака. И проделав ряд экспериментов, мы получили многообещающие результаты».

У большинства раковых клеток на всей их поверхности есть белок, известный как рецептор эпидермального фактора роста (EFGR), тогда как здоровые клетки обычно не экспрессируют этот белок настолько сильно.

Конъюгация (или связывание) наночастиц золота с антителами против EFGR, обычно называемыми анти-EFGR, позволила исследователям обеспечить связывание наночастиц с самими раковыми клетками. «Если вы добавите раствор этих конъюгированных наночастиц к здоровым и раковым клеткам и посмотрите на изображение, то с помощью простого микроскопа сможете увидеть, как раковые клетки засияют целиком, – сообщил Эль-Сэйед. – Здоровые клетки не особенно связываются с наночастицами, поэтому вы их и не увидите. При такой технике если вам хорошо видна оболочка клетки, то это – рак» (рис. 5.19, 5.20).

Исследователи обнаружили, что наночастицы золота имеют на 600% большее сродство (т.е. связывание) с раковыми, чем со здоровыми клетками. Лучше всего работали частицы размером 35 нм.

Привлекательность новой методики в том, что она не требует дорогих мощных микроскопов или лазеров. Все, что нужно для того, чтобы увидеть результат, – это обычный оптический микроскоп и белая лампа.

Другое преимущество – в скорости получения результатов. «Если вы возьмете клетки ткани, пораженной раком, и обработаете их антителами с золотыми наночастицами, то результаты можно увидеть

[1] Georgia Institute of Technology. Gold Nanoparticles May Simplify Cancer Detection (http://www.gatech.edu/news-room/release.php?id=561).

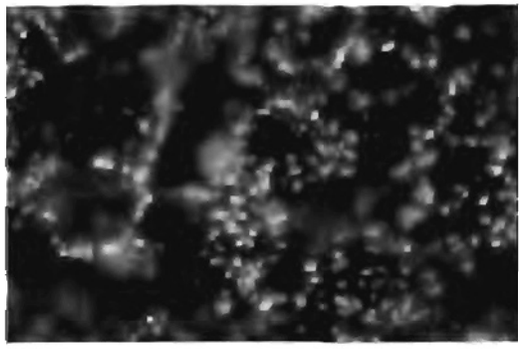


Рис. 5.19. Наночастицы прикрепляются к раковым клеткам и сидят, отражая направленный на них свет, облегчая диагностику

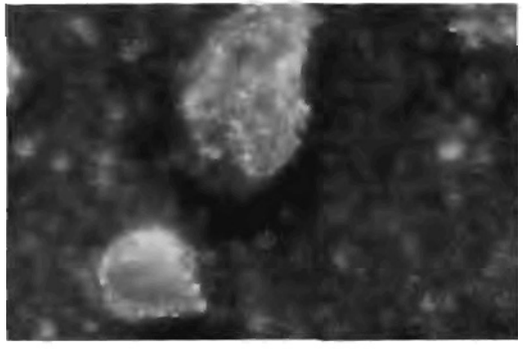


Рис. 5.20. А к здоровым клеткам наночастицы не пристают

немедленно. Рассеяние настолько сильное, что можно разглядеть каждую частицу», – рассказал Эль-Сэйед. Если можно разглядеть каждую частицу, то, соответственно, можно идентифицировать и каждую раковую клетку. Это открывает поистине удивительные возможности диагностики метастазов и опухолей, которые только начинают развиваться.

Наконец, эта методика нетоксична для человеческих клеток. Сходная методика на квантовых точках, которая использует микроскопические полупроводниковые кристаллы для маркировки клеток опухоли, опасна для человека, так как эти полупроводники токсичны.

Новый тип РНК-нанокапсул излечит от рака[1]

Ученые из Университета Пэрдью (США) сконструировали новый тип наночастиц для доставки лекарств, с помощью которых была проведена успешная терапия онкологических заболеваний в лабораторных условиях.

[1] Purdue News: Purdue scientists treat cancer with RNA nanotechnology.

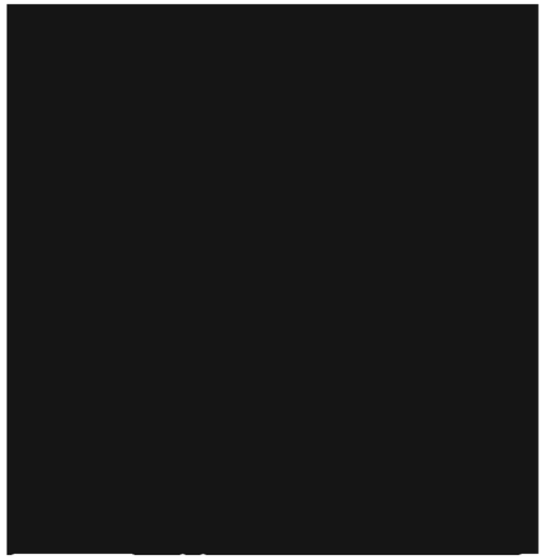


Рис. 5.21. Нанокапсула, состоящая из трех РНК-структур

Новые нанокапсулы, доставляющие лекарства внутрь клетки, состоят из трех цепей РНК (рис. 5.21), соединенных друг с другом в структуру, напоминающую по форме треугольник. РНК-нанокапсулы имеют такой размер, чтобы проникать внутрь клетки, а их строение позволяет поместить внутрь них цепочки РНК, отвечающие за остановку роста раковой клетки. Команда ученых, разработавших новое лекарство против роста раковых опухолей, недавно провела тесты РНК-наночастиц на мышах и культуре клеток человека. Результаты тестов показали, что лекарство способно бороться с онкологическими заболеваниями.

«Молекулярные структуры на основе РНК – идеальное решение для создания лекарства от рака. Вообще некоторые молекулы РНК способны эффективно бороться с онкологическими заболеваниями, но до сих пор было невозможно доставить их точно в раковую клетку, – говорит исследователь Пейхуан Гу, профессор молекулярной вирусологии из Университета Пэрдью (Гу проводил исследования по созданию РНК-нанокапсул совместно с Центром исследования онкологических заболеваний в Пэрдью, школой ветеринарной медицины и биомедицинской инженерии). – В последнее время большинство медиков надеется на то, что нанотехологии помогут доставлять противораковые агенты в клетку. И с помощью РНК-нанокапсул это более чем возможно».

Ранее доктор Гу уже создавал различные наноструктуры на основе РНК. При изучении вирального мотора вируса phi 29 он узнал, что РНК формирует наноблоки, способные соединяться в различные наноструктуры. Так, из этих наноструктур создан сам наномотор вируса, доставляющий свою ДНК в клетку.

«С помощью наночастиц доктор Гу смог доставить в опухолевые клетки три различных типа противораковых агентов, – говорит Джим Чин, ученый из Национального института медицины США. – Это уникальное достижение. Ранее удавалось доставить только один тип агента».

Группа исследователей построила из молекул РНК несколько различных «матриц» размерами от сотен нанометров до нескольких микрометров. При этом их структура может быть задана, что существенно упрощает конструирование будущих наномашин. Самосборка шла в *нанометровом масштабе, но конечные «продукты» в ряде опытов достигали* и микрометровых размеров.

«Наша работа показала, что мы можем управлять структурой трехмерных матриц, полученных с помощью самосборки молекул РНК. При этом мы можем делать матрицы различных размеров, – объясняет Гу. – В дальнейшем после проведения дополнительных исследований с помощью молекул РНК можно будет конструировать сложные наномашины».

Пока исследователи собрали из молекул РНК «кольца», «треугольники» и «стержни». Исследователи говорят, что эти структуры можно интегрировать с нанотранзисторами, нанопроводниками, нанотрубками, биосенсорами и другими уже существующими наноструктурами, чтобы получить сложные НЭМС, возможно, даже наноробототехнику.

Практическое применение в доставке лекарств пока нашли только треугольники из РНК. Для борьбы с опухолями ученые начали поиск таких форм РНК, которые могут убивать раковые клетки. В процессе исследований были найдены три формы РНК. Например, siRNA деактивирует отдельные гены в раковых клетках, другие фрагменты РНК присоединяются к белковым маркерам, характерным только для раковых клеток.

«С помощью технологии синтеза РНК-наноструктур, которую мы разработали еще при исследовании вируса phi 29, была создана наноструктура-треугольник, состоящая из трех фрагментов различных РНК, размером от 25 до 40 нм», – объясняет далее Гу.

Частицы, размер которых около 100 нм, достаточно большие для того, чтобы проникнуть через клеточную мембрану. Вот почему треугольники идеально подходят для доставки лекарств внутрь клеток.

«Одна из особенностей раковых клеток – это то, что они не перестают делиться. А молекула siRNA останавливает процесс деления клеток. Затем мы попробовали наноструктуру в деле. И оказалось, что наночастицы справились с опухолью рака груди за несколько дней», – говорит Гу.

Но и это еще не все. Команда исследователей добилась полной остановки ракообразования у подопытной мыши. Говоря простым языком, мышь вылечили от рака.

«Результаты очень обнадеживающие, однако следует провести еще несколько дополнительных исследований, прежде чем мы станем использовать наночастицы в клинических тестах на людях», – отмечает Гу. Ученым необходимо исследовать все возможные подобные эффекты от использования наночастиц. Одна из таких исследовательских задач – присоединение наночастиц непосредственно к раковым клеткам, оставляя здоровые неповрежденными. Однако ученые надеются, что наночастицы в будущем радикально изменят терапию онкологических заболеваний и помогут миллионам людей.

Наночастицы и дендромеры помогают космонавтам[1]

Вскоре наши глаза смогут служить в качестве многофункционального диагностического монитора. Исследователи из Мичиганского университета разработали методику, с помощью которой можно «на лету» установить дозу радиоактивного облучения, полученного человеком. Первыми испытателями этого метода на себе будут космонавты, которым необходимо все время контролировать степень облучения.

Исследования по разработке простого, эффективного, а главное, быстрого мониторинга состояния тела космонавта финансирует в первую очередь NASA. Команда из Мичиганского университета получила грант в размере 3 млн долл. на проведение соответствующих исследований. Работы по мониторингу состояния космонавтов велись разными командами давно.

В 2000 г. различные команды ученых разработали ряд наночастиц, содержащих флуоресцентные вещества, активирующиеся в том случае, если степень облучения организма была велика. Расскажем подробнее о прошлых достижениях мониторинга, чтобы было понятно, что придумали в Мичиганском университете.

«Назначение наночастиц – представить новый тип терапии, которая состоит в проникновении в отдельные клетки для их восстановления или избавления от них, если они слишком повреждены», – пояснил Джеймс Лири из медицинской ветви Техасского университета. Ученые Джеймс Лири и Стивен Ллойд возглавляют исследования в области наномедицины с использованием наночастиц. Вместе с ними работают Массуд Мотамеди (Техасский университет), Николай Котов (Университет Оклахомы) и Юрий Лъвов (Университет Луизианы).

Их проект фокусируется на проблеме, близкой к проблемам онкологических заболеваний. Большие дозы радиации получают астронавты, работая в космосе (особенно если будут пилотируемые полеты на

[1] University of Michigan: Molecular Biophysics and Bioengineering
Nanotechnology-Now: Astronaut's eyes may become windows on the bloodstream (10 декабря 2004 г.).

Луну или Марс), так как они лишаются естественного защитного «зонтика» – магнитного поля Земли. Даже специально разработанные материалы не могут полностью изолировать космонавтов от высокоэнергетической космической радиации. Частицы с высокой энергией проникают в тела астронавтов и, как микроскопические пули, повреждают все молекулы на своем пути. Когда ДНК клетки повреждена таким образом, клетка работает с нарушениями, часто приводящими к образованию раковых опухолей (рис. 5.22).

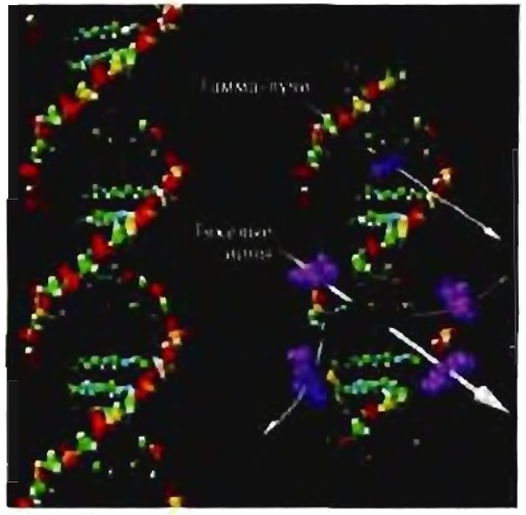


Рис. 5.22. Высокоэнергетическая космическая радиация может травмировать ДНК и способствовать раскообразованию на клеточном уровне

«Это очень важная проблема, – говорит Лири. – Если люди собираются долговременно жить в космосе, мы должны знать, как можно их защитить от космической радиации». Ученые решили, что организм *астронавтов должен сам сопротивляться гамма-излучению, потому что* разработка внешних экранирующих устройств не принесла ожидаемого эффекта.

Одно из решений этой проблемы – использование наночастиц в качестве посредников между больными клетками и устройствами мониторинга. Эти капсулы для доставки лекарств очень малы, размерами всего несколько сотен нанометров.

Простая подкожная инъекция может доставить тысячи или миллионы этих частиц в кровеносную систему пациента. Триллионы клеток в человеческом теле идентифицируют друг друга и передают сообщения с помощью сложных молекул, находящихся в их мембранах. Эти молекулы действуют как химические «флаги» для связи с другими клетками или как химические «ворота», контролирующие поступление в клетку молекул из кровотока (например, гормонов).

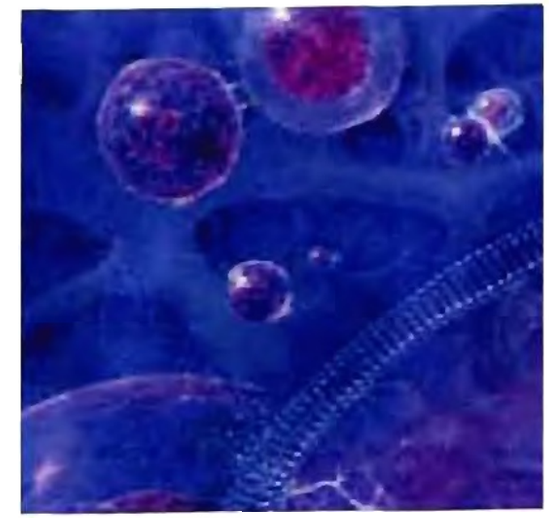


Рис. 5.23. Двухслойная мембрана (справа) отделяет содержимое клетки от внешнего окружения. Сложные молекулы во внешнем слое мембраны контролируют взаимодействия с другими клетками

Когда клетка повреждается гамма-излучением, она производит маркер – определенный класс белков, названный «CD-95», и помещает их на внешней поверхности мембраны (рис. 5.23). «Это похоже на то, что клетка говорит другой – я повреждена», – сказал Лири.

Если поместить на внешнюю поверхность наночастиц молекулы, способные присоединяться к белковым маркерам «CD-95», то ученые смогут «программировать» наночастицы для поиска клеток, поврежденных радиацией, и, возможно, использовать наночастицы для доставки специальных восстанавливающих энзимов к отдельным клеткам.

Человеческий организм и другие организмы имеют естественные энзимы, способствующие восстановлению (репарации) ДНК, правда, некоторые из них работают лучше, некоторые – хуже. «Существуют организмы, которые могут выдерживать большие дозы радиации, чувствуя себя при этом удовлетворительно», – говорит Лири. Изучая эти естественные механизмы восстановления, ученые получат возможность сконструировать такие энзимы, которые могут быть доставлены с помощью нанокапсул.

Команда Лири изучает также способы присоединения флуоресцентных молекул к поверхности наночастиц (рис. 5.24). Они могут быть использованы для отображения определенных ступеней процесса заражения и восстановления. Для разных ступеней можно будет применять разные цвета. Эти флуоресцентные метки смогут обеспечить мониторинг наночастиц внутри тела.

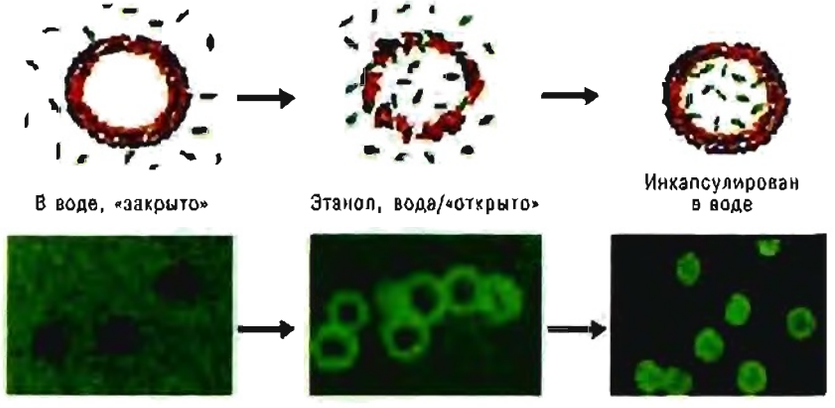


Рис. 5.24. Стенки нанокапсулы растворяются, вбирая внутрь флуоресцентное вещество. Подобные наночастицы могут быть сделаны из ряда «самособираемых» полимеров, таких, как теллурид кадмия

Все элементы этой идеи представлены порознь: ДНК-репарационные энзимы, наночастицы, флуоресцентные метки. Задача в том, как объединить это в одно работающее устройство.

«Это очень трудная проблема, и мы неспособны разрешить ее даже за три года — срок финансирования проекта. Мы пока пытаемся открыть новые области этой науки, а это само по себе большой прогресс, — говорит Лири, — но над многим еще придется поработать».

Через четыре года после изысканий Джеймса Лири команда Мичиганского университета поставила себе более тривиальную задачу: маркирование лейкоцитов, пострадавших от гамма-излучения, простыми флуоресцентными наночастицами. Суть технологии проста: пациенту вводят раствор наночастиц, которые соединяются с лейкоцитами, пострадавшими от воздействия радиации. Далее, облучая сетчатку глаза высокочастотным лазерным лучом, на цитометре можно будет подсчитать количество лейкоцитов, содержащих метки-наночастицы, и по их количеству установить, насколько серьезную дозу облучения получил космонавт.

Наночастицы, предложенные доктором Джеймсом Баркером, представляют собой дендромеры, к которым исследователи прикрепили молекулы с высокой степенью адгезии к больным лейкоцитам и флуоресцентные молекулы красителя (рис. 5.25).

Теперь космонавту не нужно будет даже сдавать кровь на анализ — степень облучения можно узнать с помощью лазерного сканера, который, сканируя сосуды сетчатки, считает количество флуоресцентных меток в протекаемой через сосуды сетчатки крови.

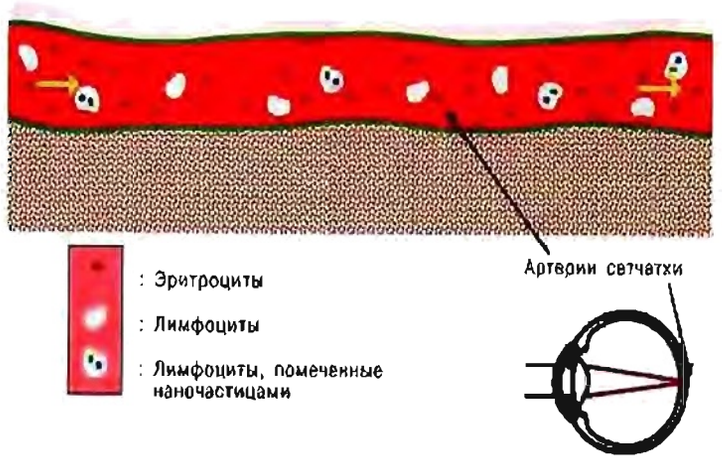


Рис. 5.25. Принцип действия нового метода, использующего дендромеры

Новый цитометр, способный считать количество вспышек от флуоресцентных частиц «на лету», был построен профессором Теодором Норрисом из команды исследователей.

В предполагаемом путешествии пилотируемого корабля к Марсу люди проведут около двух лет, постоянно получая дозы радиации. «В NASA сказали, что большинство из команды корабля получит билет в один конец, — подчеркнул Норрис. — Поэтому если команда не будет пользоваться методами ранней диагностики лучевой болезни, на Землю может никто не вернуться».

Исследователями уже проведены эксперименты на мышах, в ходе которых была продемонстрирована эффективность дендромерного мониторинга. Как говорят ученые, им необходимо еще два года, чтобы сделать работоспособную методику диагностики для человека.

FDA взяла нано под учет[1]

Американская администрация пищевых продуктов и лекарств (FDA) занимается лицензированием широкого спектра товаров (пищевые продукты, косметика, лекарства, аппаратура и ветеринария), а теперь занялась и наноматериалами.

FDA определила нанотехнологии как отрасль разработок и исследований, регулируемую по следующим причинам:

- существующие материалы имеют атомный, молекулярный и макромолекулярный уровни, которые размером и функцией лекарств/устройств укладываются в шкалу от 1 до 100 нм;

[1] National Nanotechnology Initiative: FDA regulation of Nanotechnology Products.

- изобретения и используемые устройства, аппараты и системы обладают новыми свойствами ввиду их малых размеров;
- наносистемы и наноматериалы имеют способность контролировать материю и манипулировать ею на атомарном уровне.

С улучшением терапевтических средств с помощью нанотехнологии станет возможной, например, доставка лекарственных средств к отдельным клеткам организма. В этой ситуации ответственность за надзором над такими продуктами берет на себя Office of Combination Products. Содействовать регуляции продуктов нанотехнологии будет агентство, сформированное из NanoTechnology Interest Group (NTIG). Ежеквартальные конференции NTIG станут эффективным средством общения между центрами.

Большинство центров также имеют рабочие группы, которые укрепляют связи между различными подразделениями. Они расширяют круг продукции, связанной с нанотехнологиями, которые регулируют федеральные агентства. Широту спектра данной продукции, которую собирается регулировать FDA, покажет будущее.

Для того чтобы понять, как FDA собирается регулировать рынок нанопродуктов, прочтите этот документ: FDA regulation of Nanotechnology Products.

«Печатный станок» и экспресс-анализ ДНК[1]

Как в свое время печатный пресс положил начало эры книгопечатания, так и в наше время разработанная исследователями из Массачусетского технологического института (MIT) технология нанопечати («nanoprinting») позволит начать массовое производство наноустройств и биочипов на ДНК-основе.

Один из первых кандидатов на роль будущего массового печатного продукта – ДНК-матрицы для экспресс-диагностики различных заболеваний. Так, например, болезнь Альцгеймера или СПИД в анализе пациента можно будет определить с помощью ДНК-биочипа за несколько минут. Эти экспресс-анализаторы могут вскоре появиться в больницах благодаря дешевому производству этих анализаторов с помощью технологии «печатного пресса».

Необходимость в технологии дешевого массового производства наноустройств появилась с открытием первого ДНК-анализатора на основе микрожидкостных систем. К сожалению, все без исключения методы производства на сегодняшний день не могут гарантировать нужную точность изготовления при производстве НЭМС в больших количествах, а если точность соблюдается, то стоимость производства существенно возрастает.

[1] Nanotech-Now: New technique may speed DNA analysis (http://www.nanotech-now.com/news.cgi?story_id=09664).

Ученые из MIT не стали выдумывать ничего нового, а взяли за основу своего «печатного пресса» уже существующую в природе технологию копирования ДНК и РНК. Как сказал профессор Стеллаччи, руководитель исследований, «природа придумала самый эффективный метод печатания наноструктур на примере дубликации молекул ДНК». Новый метод исследователи назвали супрамолекулярным нанопечатанием (Supramolecular NanoStamping – SuNS). Он состоит в том, что цепи ДНК, нанесенные специальным образом на подложку, формируют такую же матрицу из комплементарных им цепей на другой матрице (рис. 5.26). Процесс прост, и его можно повторить неограниченное число раз. При этом полученная структура имеет ту же геометрию, что и ДНК-оригинал.

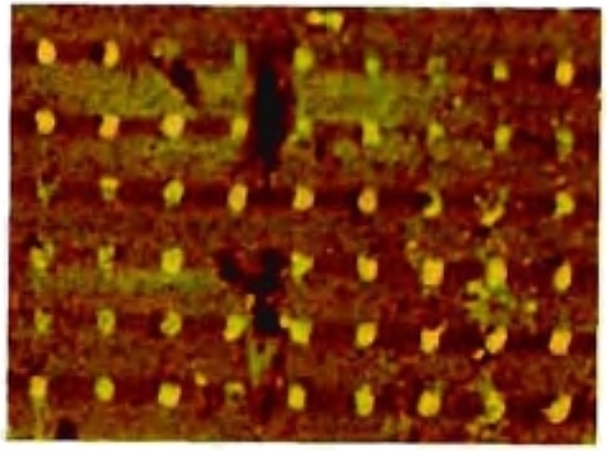


Рис. 5.26. Матрица ДНК-точек, изготовленная по SuNS-технологии (каждая диаметром около 200 нм)

Одно из таких устройств – ДНК-матрицы, уже используемые для анализа ДНК человека. На маленькой стеклянной подложке расположены около 500 000 «точек», содержащих молекулы ДНК. Однако стоимость такой матрицы довольно высока – около 500 долл., и для ее создания необходимо проделать 400 операций по нанесению ДНК-точек. Естественно, что такая ДНК-анализирующая система не пользуется спросом на рынке медицинской экспресс-диагностики «на каждый день».

Поэтому заявления ученых из MIT вселяют оптимизм: они утверждают, что могут создавать такой же массив всего за три производственных операции. И стоить готовый продукт будет менее 50 долл. «Наша технология может полностью изменить систему диагностики заболеваний и экспресс-анализирования ДНК, – говорит Стеллаччи. – Быстрая

диагностика таких заболеваний, как СПИД, гепатит и болезнь Альцгеймера, станет обычной рутинной задачей».

Другое преимущество этой технологии состоит в том, что кроме диагностики заболевания врач-диагност сможет получить о нем самую детальную информацию. «Чем больше мы будем делать ДНК-матриц и чем больше будем анализировать заболеваний, тем больше мы о них узнаем», – говорит Стеллаччи.

Технология SuNS может быть полезна не только в диагностике болезней. На ее основе можно производить наноструктуры из металлов или полупроводников практически любой двумерной геометрии. Также на ее основе можно дешево производить в большом количестве наножидкостные системы, одноэлектронные транзисторы, оптические биосенсоры и нанопроводники.

Мозг на нанопроводниках[1]

Представьте себе, что через ваши артерии врачи проводят тонкие нанопроводники, которые достигают головного мозга, устанавливая мониторинговую связь с ним. Зачем это нужно? Для лечения и диагностики различных заболеваний, например болезни Паркинсона или Альцгеймера, говорят исследователи из Массачусетского технологического института (США).

Ученый в области нейронаук Рудольфе Ллинас и его коллеги предвидят, что с помощью подобной процедуры можно будет получать информацию в реальном времени о различных отделах мозга пациента. Теоретически можно будет «подобраться» к отдельным нервным узлам и даже клеткам по тонким кровеносным сосудам.

В июльском выпуске «Журнала исследования наночастиц» 2005 г. ученые поясняют, как будет проходить процедура имплантации нанострун. В одну из крупнейших артерий больного вводится катетер, через который пучок нанострун проникнет в кровеносную систему (рис. 5.27). Так как их диаметр исчисляется несколькими нанометрами, в то время как диаметр самых тонких капилляров составляет несколько микрометров, то наноструны не смогут помешать естественной циркуляции крови, переносу газов и транспорту нутриентов. Потом «нанобукет» проводится непосредственно в мозг, где отдельные наноструны распределяются на передачу информации от различных участков головного мозга.

Для подтверждения нового метода диагностики ученые поставили ряд экспериментов с живыми образцами ткани. Им удалось ввести платиновый нанопровод по кровеносному сосуду и с его помощью получать сигналы от нервных клеток, лежащих около капилляра.

[1] Nanotech-Now: Wiring the Brain at the Nanoscale.

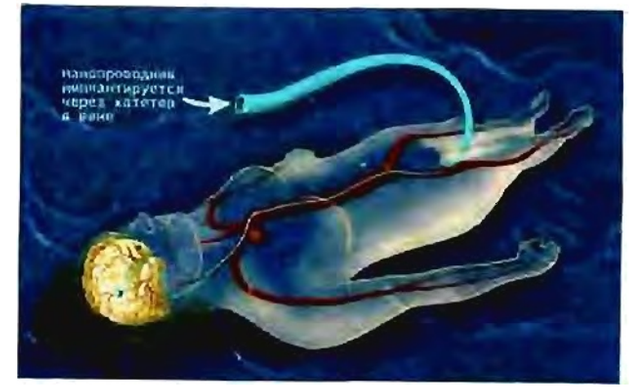


Рис. 5.27. Процесс имплантации нанозонда

Как говорит Рудольфе Ллинас, современные методы диагностики мозга (томография и магниторезонансная диагностика) не дают полной информации о тех электрических процессах, которые происходят в головном мозге. И естественно, они не могут выделить из общей картины сигналы от нервного узла, не говоря уже об отдельных клетках. «Поэтому мы решили предложить метод, позволяющий изучать мозг на уровне отдельных взаимодействий "нейрон – нейрон". При этом внедрение наноэлектродов будет нетравматичным», – говорит Майкл Роко, председатель Национальной инициативы США в области нанотехнологии. Как оказалось, Роко тоже заинтересован этой проблемой и наблюдает за достижениями ученых.

С помощью наноэлектродов также можно будет посылать в мозг электрические сигналы, что дает надежду на излечение таких заболеваний, как болезнь Паркинсона. Только вот как заставить нанопроводник проникнуть в строго определенные отделы головного мозга? Для этого ученые предлагают использовать полимерный нанопроводник, который изгибается в зависимости от поданного на него напряжения. Так, следя за имплантом с помощью традиционных методов диагностики, врач сможет направить нанопровод-зонд через капилляры в интересующие его места головного мозга. Нанопроводники-полимеры в 20 раз тоньше платиновых, а это значит, что с их помощью врач сможет добраться до отдельных нервных клеток.

«Этот новый класс наноматериалов характеризуется большой степенью свободы (при активации полимера электричеством). И создание управляемого гибкого импланта стало возможным только благодаря нанотехнологиям, – говорит один из исследователей Массачусетского технологического института. – Так что не исключено, что в скором времени у врачей появится новый нейроинструмент, который будет диагностировать и лечить заболевания головного мозга».

Заявки на книги присылайте по адресу:
125319 Москва, а/я 594
Издательство «Техносфера»
e-mail: knigi@technosphera.ru
sales@technosphera.ru
факс: (495) 956 33 46

В заявке обязательно указывайте
свой почтовый адрес!

Подробная информация о книгах на сайте
http://www.technosphera.ru

Наноматериалы. Нанотехнологии.
Наносистемная техника
Мировые достижения за 2005 год
Сборник под редакцией
д.т.н., профессора П.П. Мальцева

Компьютерная верстка – В.В. Павлова
Дизайн – И.А. Куколева
Дизайн книжных серий – С.Ю. Биричев
Корректор – И.И. Никитина
Выпускающий редактор – О.Н. Кулешова
Ответственный за выпуск – О.А. Казанцева

Формат 60x90/16. Печать офсетная.
Гарнитура Ньютон
Печ.л. 9,5. Тираж 3000экз. Зак. № 821.
Бумага офсет №1, плотность 65г/м^2

Издательство «Техносфера»
Москва, Лубянский проезд, дом 27/1

Диапозитивы изготовлены ООО «Европолиграфия»

Отпечатано в ООО «Чебоксарская типография №1»,
428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15