

Оглавление

Занятие 1	4
<u>Лекция</u> : Введение в курс. Нанотехнологии - основа современного этапа НТР.	4
<u>Викторина для юных нанотехнологов</u>	11
Занятие 2	13
<u>Лекция</u> : Сканирующий туннельный и атомно-силовой микроскопы – «глаза» и «пальцы» нанотехнологии.	13
<u>Вопросы для самопроверки</u>	21
<u>Задания</u>	21
Занятие 3	23
<u>Лекция</u> : Нанокластеры и квантовые точки.....	23
<u>Вопросы для самопроверки</u>	30
<u>Задания</u>	30
Занятие 4	31
<u>Лекция</u> : Магнитные кластеры и нанослои	31
<u>Вопросы для самопроверки</u>	40
<u>Задания</u>	40
Занятие 5	41
<u>Лекция</u> : Фуллерены и нанотрубки.	41
<u>Вопросы для самопроверки</u>	50
<u>Задания</u>	50
Занятие 6	52
<u>Лекция</u> : Фотонные кристаллы – оптические сверхрешетки.	52
<u>Вопросы для самопроверки</u>	60
<u>Задания</u>	60
Занятие 7	61
<u>Лекция</u> : Нанoeлектроника	61
<u>Вопросы для самопроверки</u>	73
<u>Задания</u>	73
Занятие 8	74
<u>Лекция</u> : Наноматериалы	74
<u>Вопросы для самопроверки</u>	82
<u>Задания</u>	82
<u>Сборник интегрированных задач повышенного уровня</u>	83
Занятие 9	88
<u>Лекция</u> : Ассемблер. МЭМС и НЭМС. Наномоторы.	88
<u>Вопросы для самопроверки</u>	96
<u>Задания</u>	97
<u>Тест для промежуточного контроля</u>	98

Занятие 10.....	102
<u>Лекция</u> : Нанотехнология и медицина.	102
<u>Вопросы для самопроверки</u>	110
<u>Задания</u>	110
Занятие 11.....	111
<u>Лекция</u> : Нанотехнология в быту. «Умная» одежда и обувь	111
<u>Вопросы для самопроверки</u>	117
<u>Задания</u>	117
<u>Презентация к лекции</u>.....	117
Занятие 12.....	119
<u>Лекция</u> : Нанотехнология в военном деле. Костюмы солдата, спасателя, космонавта.....	119
<u>Вопросы для самопроверки</u>	124
<u>Задания</u>	124
Занятие 13.....	125
<u>Лекция</u> : Перспективы и проблемы нанотехнологии.....	125
<u>Вопросы для самопроверки</u>	128
<u>Задания</u>	128
<u>Итоговые задания</u>.....	129
Занятие 14. Физические основы нанотехнологий.....	130
Занятие 15. Сканирующий зондовый микроскоп «NANOEDUCATOR»	136
Занятие 16. Создание и защита проекта.....	137
<u>Положение об учебно-исследовательском проекте учащихся</u>	150
<u>Примеры презентаций ученических проектов</u>.....	153

Занятие 1.

Лекция : Введение в курс. Нанотехнологии - основа современного этапа НТР.

Первая и вторая научно-технические революции

В течение тысячелетий человек использовал в быту и технике макроскопические тела, состоящие из большого числа атомов, будь это каменный топор или авиалайнер. Первая научно-техническая революция - **индустриальная**, или **энергетическая**, - условно отсчитывается с получения Дж. Уаттом в 1769 г. основного патента на усовершенствованный паровой двигатель, который привел к резкому увеличению производительности труда во всех видах производства, добыче ископаемых, в сельском хозяйстве и на транспорте. До этого источником энергии была энергия ветра, падающей воды и (очень часто) просто мышечная сила животных и людей.

С началом развития микроэлектроники в 1960-х гг. началась вторая научно-техническая революция - **информационная**. Автомобили и другие средства передвижения, станки и приборы оставались макроскопическими телами, так как единицей масштаба служат размеры человеческого тела, но управляющие элементы, устройства для передачи и приема информации становились все сложнее, а составляющие их единицы (транзисторы, конденсаторы, сопротивления) все миниатюрнее. Эмпирический *закон Мура* (удвоение плотности *чипов* каждые полтора-два года) оказался достаточно универсальным и уже 40 лет выполняется в ряде областей, основанных на так называемых «критических» технологиях. Экстраполяция этих результатов на наше время неизбежно приводит электронику от микроструктур к наноструктурам: транзисторы и другие элементы вскоре должны будут состоять из считанного числа атомов.

Третья научно-техническая революция

Появление и развитие нанотехнологии означали начало третьей научно-технической революции, которая на наших глазах постепенно охватывает все области цивилизации: технику, медицину, экологию, освоение космоса и т. п. и, по мнению специалистов, изменит облик мира уже к концу первого - началу второго десятилетия XXI в.

Приставка «нано» означает одну миллиардную, 10^{-9} . На греческом языке «нано» означает «карлик». Нанометр (10^{-9} м), видимо, впервые ввел А. Эйнштейн при рассмотрении размеров молекулы сахара. В низкомолекулярных твердых телах (металлах, ковалентных кристаллах типа алмаза, ионных кристаллах) расстояние между атомами составляет десятые доли нанометра: на отрезке длиной 1 нм уложится несколько атомов. По принятому международному определению наноструктуры могут иметь размеры от 1 до 100 нм хотя бы в одном направлении (сверхтонкие пленки и поверхности), или только в двух (нанонити и нанотрубки), или по всем трем направлениям (кластеры) и в целом содержать большое число атомов, но их свойства все равно принципиально отличаются от обычных макроскопических тел.

Наноматериалами называются макроскопические материалы, если элементами их структуры являются наноструктуры, наноразмерные элементы.

Свойства наночастиц изучает нанонаука, находящаяся на границе физики, химии, биологии и информатики. Нанотехнология разрабатывает пути получения и использования наноструктур, однако фактически этот международный термин понимается шире, чем русский термин «технология».

Технологией (technology) в англоязычных странах обозначают умение, систему зна-

ний, процессов, средств создания и применения продуктов труда. Само понятие «нанотехнология» было введено в 1974 г. японским исследователем Норио Танигучи применительно к точности обработки деталей.

Природные и искусственные наночастицы

Фактически человек давно использовал микро- и наноструктуры в технике. Это мельчайшие частицы железа и углерода в стали, катализаторы с развитой поверхностью, мелкие частицы в различных эмульсиях или в композиционных материалах. Итальянские ученые выяснили, что знаменитая цветная глазурь на средневековой керамике из города Дерута содержит наночастицы металлов (серебра, меди и др.). Наночастицы металлов определили и красоту средневековых витражей.

Природные наночастицы, в частности, образуют разные функциональные части живых организмов: ДНК, различные белки и пр. На рисунке 1 представлена фотография магнитных наночастиц внутри бактерии, эти частицы помогают ей ориентироваться в магнитном поле Земли. Аналогичные магнитные частицы с пока неясной функцией имеются и в мозгу человека.

Вообще, структурные объекты наноразмеров, составляющие части макроскопических тел, являются скорее правилом. Однако нанотехнология впервые объединила все эти разнообразные структуры по размерному принципу, а единый принцип, подход сразу дает иные перспективы для исследования и применения. Достаточно вспомнить *кибернетику* и *синергетику*.

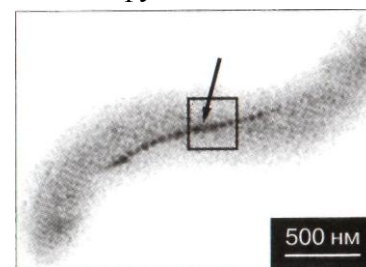


Рис. 1. Магнитные наночастицы внутри бактерии [4]

До недавнего времени физика и химия изучали два крайних случая — отдельные атомы и молекулы или макроскопические объекты, содержащие большое число частиц. Для привычных нам макроскопических тел действуют статистические законы усреднения их свойств, как действует в демографии большого города статистическое усреднение возраста, роста, образования и других показателей населения. Наноструктуры занимают промежуточное положение между отдельными атомами, свойства которых описываются квантовой механикой, и макроскопическими телами, в которых свойства отдельных атомов усреднены.

Свойства наночастиц

Многие физические законы, справедливые для макрообъектов, для наночастиц нарушаются. Например, несправедливы известные формулы сложения сопротивлений проводников при их параллельном и последовательном соединении. Вода в нанопорах горных пород не замерзает при температуре $-20-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура плавления наночастиц золота существенно меньше температуры плавления массивных образцов.

В последние годы во многих публикациях приводятся эффектные примеры влияния размеров частиц того или иного вещества на его свойства - электрические, магнитные, оптические. Так, цвет рубинового стекла зависит от содержания и размеров **коллоидных** (микроскопических) частиц золота. Коллоидные растворы золота могут дать целую гамму цвета - от оранжевого (размер частиц менее 10 нм) и рубинового (10-20 нм) до синего (около 40 нм). В лондонском музее Королевского института хранятся коллоидные растворы золота, которые получены еще М. Фарадеем, впервые связавшим вариации их цвета с размером частиц.

Доля поверхностных атомов становится все больше по мере уменьшения размеров частицы. Для наночастиц практически все атомы «поверхностные», поэтому их химическая активность очень велика.

Корпускулярно-волновой дуализм позволяет приписать каждой частице определенную длину волны. В частности, это относится к электрону в кристалле, элементарным атомным магнетикам и пр. Их поведение описывается волновыми характеристиками. Тепловые колебания атомов кристалла являются коллективным процессом: отдельные атомы колеблются не независимо, а участвуют в упругих тепловых колебаниях разной частоты, охватывающих весь кристалл. Этим волнам сопоставляют своеобразную частицу - **фонон** - квант энергии упругих колебаний, по аналогии с фотоном - квантом энергии электромагнитных колебаний. Размеры макроскопических тел на много порядков больше этих длин волн. Соответствующая же частице длина волны может «не уместиться» на наночастице.

Общая причина отличия свойств наносистем от свойств макроскопических систем - это сопоставимость их размеров с длиной волн, определяющих эти свойства. Поэтому наночастички железа при комнатной температуре ведут себя не как ферромагнетики, а как парамагнетики.

Наконец, еще одна особенность наноструктур, важная для электроники, - вместе с уменьшением размеров системы уменьшается время протекания в ней разнообразных процессов, т. е. увеличивается быстроедействие.

Необычные свойства наноструктур затрудняют их тривиальное техническое использование и одновременно открывают совершенно неожиданные технические перспективы.

Особенно важным для медицины и биологии является то, что наноразмер - один из основных масштабов живого организма. Это позволяет ставить задачу целенаправленного внедрения наноструктур в живой организм (в том числе человека), например, с целью очистки кровеносных сосудов или локального введения лекарств. Одновременно появляется уже реализуемая сейчас возможность сочетания электронных и микро-механических устройств с «живыми» наноструктурами, например для создания нанороботов (см. гл. 8) или решения задач нанoeлектроники (см. гл. 6).

Общие принципы получения наночастиц



Рис. 2. Сверхточный регулятор движения для ассемблера [40*]

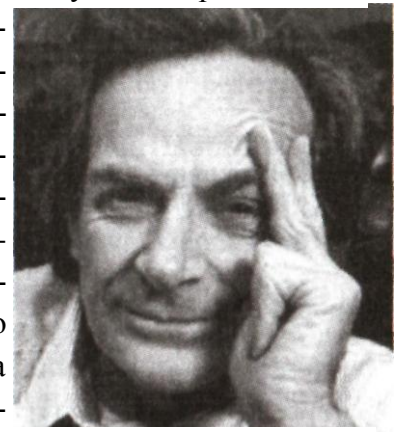
Огромную роль при получении наноструктур играют процессы *самоорганизации*. При решении задачи создания квантовых точек (см. гл. 2) сотрудники лаборатории академика Ж. И. Алферова подробно исследовали и творчески использовали закономерности этих процессов. Самоорганизация используется при получении фотонных кристаллов, моделирующих структуру опала (см. гл. 5). Недавно был получен метод создания микроскопических колец из частиц кобальта диаметром менее 100 нм (см. рис. 3.7). Эти кольца формируются самопроизвольно и сохраняют намагниченность при комнатной температуре. При этом суммарное магнитное поле в кольце может быть ориентировано или по часовой стрелке, или против, что может быть основой энергонезависимой двоичной памяти.

Квантовый характер нанотехнологических процессов делает их в высшей степени наукоемкими. Для решения конкретных задач используется *атомно-молекулярный дизайн*, включающий *компьютерное моделирование* и квантово-механические расчеты. Некоторые расчеты оказываются столь сложными, что не хватает мощности современных компьютеров. На рисунке 2 изображен молекулярный регулятор скорости для наноробота - итог компьютерного моделирования.

Особенности, связанные с размерами наноструктур, создают трудности в расчетах и объяснении их свойств. Но эти же особенности, в свою очередь, открывают новые необозримые перспективы для техники. Развитие физики всегда определялось обратной связью с техникой: очередные потребности техники ставили задачи перед физикой, а физика открывала новые возможности для техники. Однако, пожалуй, никогда еще их взаимное влияние и быстрая реакция на новые результаты не проявлялись так очевидно, как в нанотехнологии. Одна из причин - перспективы нанoeлектроники.

История возникновения нанотехнологии

Отцом нанотехнологии считают одного из самых знаменитых физиков нашего времени, лауреата Нобелевской премии Р. Фейнмана, которого иногда сравнивают по широте и ясности предвидения с Леонардо да Винчи. Выступая 29 декабря 1959 г. перед Американским физическим обществом (лекция называлась «Есть много места там внизу. Приглашение в новый мир физики» [1]), он высказал мысль, что «принципы физики... не говорят о невозможности манипулирования веществом на уровне атомов». Фейнман впервые высказал идеи о возможности микрозаписи с использованием ионных пучков шириной всего несколько нанометров, создании из небольших скоплений атомов вычислительных систем, массовом производстве на миллионах микроскопических фабрик микродеталей и т. п. В те годы это казалось научной фантастикой. Но уже в 1981 г. Г. Биннинг и Г. Рорер (швейцарское отделение «IBM») изобрели сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), а в 1986 г. Биннинг - атомно-силовой микроскоп (АСМ) (см. гл. 1). СТМ и АСМ называют «глазами и пальцами» нанотехнологии. С их помощью можно «видеть» отдельные атомы и манипулировать ими. На рисунке 1 на цветной вклейке приведена знаменитая фотография «загон для скота»: с помощью СТМ на чистую поверх-



Ричард Филлипс Фейнман

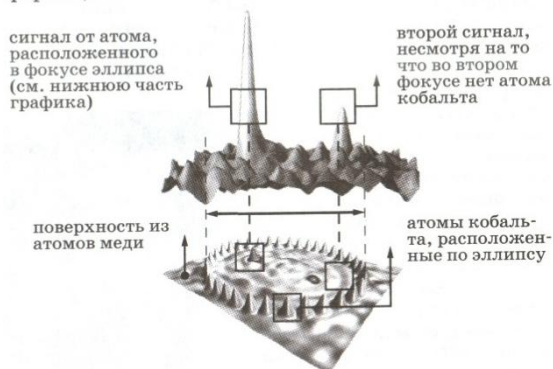


Рис. 3. «Шепот атома»: — медная подложка, на которой с помощью СТМ по эллипсу расположены атомы кобальта и один атом кобальта в левом фокусе эллипса, а также результат последующего наблюдения объекта с помощью атомного силового микроскопа

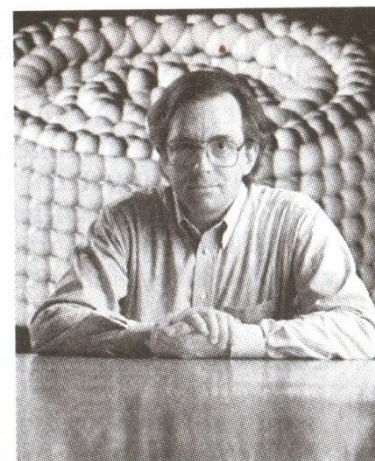
ность меди высажены по окружности с радиусом около 140 А (ангстрем) 48 атомов железа, причем СТМ воспринимает не только их, но и электроны меди внутри окружности. «Волны» на фотографии отражают состояние свободных электронов меди внутри «загона». Фотография («шепот атома») на рисунке 3 демонстрирует наличие сигнала в одном («пустом») фокусе эллипса, построенного из атомов кобальта, от атома, помещенного в другом фокусе. Ситуацию сравнивают с акустическими особенностями

стями зала, в котором можно не слышать громкого разговора вблизи, но услышать шепот из дальнего угла. Автор эксперимента Дон Айглер полагает, что эту парадоксальную ситуацию можно использовать для передачи информации в наномире.

Таким образом, на смену старой технологии получения различных материалов и устройств, которую называют технологией «сверху вниз» (*top-down*), впервые пришла технология «снизу вверх» (*bottom-up*). В технологии «сверху вниз» из макроскопических материалов различными методами получали другие макроскопические или микроскопические материалы и устройства, применяя дробление, растворение и осаждение, обработку поверхности электронным или лазерным излучением и т. п. В новой технологии «снизу вверх» любой материал или устройство, уже существующее, в природе или создаваемое впервые, собирают, начиная с отдельных атомов, по безотходной технологии. Такая сборка напоминает детскую игру «лего». В настоящее время эти две технологии часто сочетаются.

Очевидно, что массовая технология сборки даже для наноструктур, состоящих из небольшого числа атомов, с помощью сканирующего микроскопа невозможна. Поэтому так важна разработка соответствующих процессов самоорганизации.

Объединяя идеи Фейнмана и фон Неймана, занимавшегося разработкой теории самовоспроизводящихся роботов, Э. Дрекслер, работавший в то время в лаборатории искусственного интеллекта Массачусетского технологического института, рассмотрел возможность сборки (асSEMBЛИРОВАНИЯ) частиц и молекул с помощью молекулярных самовоспроизводящихся роботов - ассемблеров. Эта область применения нанотехнологии, позволяющая говорить о новой научно-технической революции, сформулирована Дрекслером в книге «Машины созидания» [2]. Десемблер «разбирает» систему на части, чтобы после анализа можно было бы перейти к синтезу подобных систем или нанообъектов. Позднее (1992) Дрекслер выдвинул идею нанофабрик и в настоящее время вместе с К. Фениксом работает по ее развитию; по их мнению, эффективнее и безопаснее использовать жестко позиционированных нанороботов на больших производствах типа сборочных конвейеров с контролируемым запасом сырья. Развивая идеи медицинского применения нанороботов, Дрекслер провозгласил нанотехнологию как «путь к бессмертию и свободе».



Эрик Дрекслер

Ближайшие перспективы нанотехнологии

В ближайшем будущем планируется создание «умных» материалов с памятью, самозалечивающихся материалов, нанороботов, существующих внутри человеческого тела и обеспечивающих его нормальное функционирование, предварительное освоение дальних районов космоса нанороботами и т. д.

Первые прогнозы пути развития нанотехнологии, воспринимавшиеся как фантастический кинофильм, оправдываются, причем с опережением по времени.

Вместе с тем уже Дрекслер в своей книге «Машины созидания» проанализировал возможные опасности, связанные с неконтролируемым развитием нанотехнологии, в том числе опасности в военном деле и в нарушении прав человека.

Технически развитые страны во всем мире вкладывают все больше средств в нанонауку и нанотехнологию. В 2003 г. государства всех стран мира потратили на нанотехнологию 2 млрд долларов, после чего данная научная область стала самой финансируемой. По величине финансирования, активности научных исследований и их внедрению безусловными лидерами считаются США, Япония, Западная Европа и Южная Корея. В число лидеров стремится выйти Китай. В последние годы резко активизировались Сингапур, Тайвань, Израиль, Индия, в основном в области конкретных прикладных исследований. Небольшие национальные нанотехнологические программы имеют Южная Африка, Аргентина, Чили, Мексика.

Япония первая ввела десятилетнюю Правительственную программу в области нанотехнологических исследований. Особое внимание было уделено созданию нанозлектроники, способной работать в жестких температурных условиях, соответствующих космосу или ядерному взрыву. Позже, в 2000 г., была разработана Национальная нанотехнологическая программа в США. В качестве наиболее ответственных направлений нанотехнологии на первое место программы были поставлены задачи создания ассемблеров, исследования возможностей применения нанотехнологии в шифровании, оборонных задачах и искусственном интеллекте. Свою национальную программу по нанотехнологии начиная с 2007 г. формирует и Россия.

Очень большой объем средств тратят ведущие фирмы: «IBM», «Intel», «Kraft», «Hitachi», «Motorola», «Mitsubishi» и др. Возникают новые фирмы, ориентированные исключительно на нанотехнологию (создание, внедрение, реклама, юридические услуги). Скорее всего, нанопромышленность по финансовым вложениям во всем мире в ближайшие годы вырастет практически от нуля до триллиона долларов в год с ежегодным приростом рынка на 40%. Пока наиболее очевидные внедрения нанотехнологии приходится на такие отрасли, как бытовая (электроника), энергетическая, медицина и парфюмерия, сельское хозяйство.

Практически ежедневно публикуется около ста научных статей по нанотехнологии и одна монография или сборник. Фундаментальные научные исследования выполняются прежде всего в специализированных научных центрах и лабораториях и в университетах. В России это ряд институтов Академии наук РФ, ведущие вузы страны. Система научных грантов поощряет как организации, так и отдельных исследователей, особенно молодых.

В 2000 г. Нобелевская премия за «основополагающие работы в области информационных и коммуникационных технологий» была присуждена академику РАН Жоресу Ивановичу Алферову (вместе с Гербертом Кремером и Джоном С. Килби). Его портрет, выполненный в наномасштабе на сверхтонкой титановой пленке методом анодно-окислительной *литографии*, приведен на рисунке 2 на цветной вклейке.

Третья научно-техническая революция требует не только принципиально новой научной и технической подготовки кадров, но и общей психологической подготовки. Учитывая это, в ряде промышленно развитых стран (США, Германия, Япония) курсы нанотехнологии введены в школьные программы. Третья научно-техническая революция резко увеличит потребности в квалифицированных кадрах, усилит роль межпредметных дисциплин. Прогнозируется, что логически связанное с НТР «открытое образование» (E-learning) прочно войдет в число «критических технологий»: в развитых странах объем капиталовложений в него, в соответствии с законом Мура, уже ежегодно удваивается.

«По многим прогнозам, именно развитие нанотехнологии определит облик XXI века, подобно тому как открытие атомной энергии, изобретение лазера и транзистора определили облик XX столетия» (Ж. И. Алферов [3]).

Литература

1. *Фейнман Р.* Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики // Химия и жизнь. 2002. № 12. С. 20.
2. *Drexler K. E.* Engines of creation. New York, AnchorPress/ Doubleda, 1986 (e-drexler.com).
3. *Алферов Ж. И.* и др. Наноматериалы и нанотехнологии // Нано- и микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3.

Викторина для юных нанотехнологов.

1. Все вокруг говорят о квантовых точках, что, мол, они почти все могут. Что же это такое, «квантовая точка»?

- большой атом с магическим числом нуклонов
- маленькая молекула с многоцентровыми связями
- пылинка полупроводника
- соринка в сверхпроводнике 2 рода
- микрократер, оставленный алмазным индентором атомно-силового микроскопа

2. Мистическое и злобное существо «гном» можно рассматривать как символ нанотехнологий. Почему? Потому что он:

- злой
- маленький
- богатый
- скрытный
- все вышеперечисленно

3. Завод А произвел 1000 т нанопорошка для зубной пасты по цене 3 копейки за грамм, а завод Б - 123 тонны нанопорошка для крема обуви "Киви" по цене 1 рубль за килограмм. Сколько составит финансовая выручка от продажи высокотехнологичной продукции мирового уровня для обоих заводов?

- нисколько
- несколько
- 1123 тонны
- 10 рублей
- больше 1000 рублей

4. Что такое «кантилевер»?

- важная часть АСМ
- штатная часть медицинского наноробота
- золотая игла акупунктурной наномедицины
- форма существования нитевидных кристаллов
- нановесы

5. Что такое «кубит»?

- кубический бит
- единица измерений расстояний в наномире
- элемент квантового компьютера
- одно из четырех квантовых чисел электрона
- поток магнитного поля в устройствах спинтроники

6. Американский физик Фейнман призывал исследовать то, где много места. Его много где?

- у них
- вверху
- внизу
- по боку

7. Многие ученые упоминают в своих статьях аббревиатуру SQUID (кальмар по - английски). Что же это такое?

- действительно кальмар (морская тварь)
- прибор для точного измерения величины магнитного потока
- улучшенный ампервольтметр
- прибор для измерения температуры холодной плазмы
- метод получения планарных наноматериалов

8. Когда солдаты идут в ногу по мосту, мост раскачивается и падает из-за резонанса. Резонанс – вообще страшное явление, разрушительное. А с какими классами химических веществ связан плазмонный резонанс?

- с углеродными наноматериалами
- с биополимерами
- с металлами
- с тонкопленочными гетероструктурами на сапфире, генерирующими вторую гармонику
- с наноалмазами

9. Анализ величины «двумерного давления» при получении наноматериалов важен в технологии

- получения плоских фракталов путем микровзрыва
- при сборе нефтяной пленки у берегов Ирландии
- при анализе оптически-чистых кристаллов с эффектом двулучепреломления
- при движении фронта кристаллизации в градиенте магнитного поля
- при получении пленок методом Лэнгмюра-Блоджетт.

10. Какое из перечисленных ниже явлений связано с метаматериалами?

- Обратный эффект Доплера
- Суперлинза для преодоления дифракционного барьера
- Шапка-невидимка
- Обратный эффект Вавилова-Черенкова
- Всё вышеперечисленное

Занятие 2.

Лекция: Сканирующий туннельный и атомно-силовой микроскопы - «глаза и пальцы» нанотехнологии

Сканирующие микроскопы

Исследование поверхностных явлений стало одним из актуальных направлений науки и основой передовых технологий. В наше время новейшая технология может разместить на одном квадратном миллиметре кремниевого кристалла (чипа) несколько миллионов различных элементов (транзисторов, резисторов, конденсаторов). В соответствии с *законом Мура* размеры отдельных элементов стали меньше микрона, 10^{-6} м. Роль свойств поверхности чипа существенно возросла по сравнению со свойствами вещества во всем объеме.

Сегодня появилась возможность наблюдать отдельные атомы и группы атомов, исследовать их участие в разнообразных физико-химических процессах на поверхности с помощью ряда **сканирующих** микроскопов.

Все сканирующие микроскопы (электронный, туннельный, атомно-силовой, оптический ближнего поля и др.) последовательно исследуют поверхность вначале по некоторой оси X , затем делают небольшой скачок в перпендикулярном направлении и исследуют поверхность, возвращаясь по оси X назад. По подобному принципу работает электронно-лучевая трубка телевизора.

Туннельный эффект. Зонная теория и гетероструктуры

В основе работы сканирующего туннельного микроскопа лежит *туннельный эффект*.

Поясним принцип этого эффекта на простом примере. Представим себе классическую частицу в виде шарика (считаем его материальной точкой), который катится в поле силы тяжести. Кривая на рисунке 1.1, *a* изображает его траекторию. «Горку» называют потенциальным барьером, потому что с высотой h подъема шарика массой m его потенциальная энергия mgh должна возрастать, а кинетическая энергия из-за этого падать. Высотой потенциального барьера называют потенциальную энергию частицы на «вершине горки», она равна $U_0 = mgh_0$. Если кинетическая энергия частицы $E_{кин}$ больше высоты потенциального барьера U_0 , то частица преодолет барьер и окажется по другую сторону. Если $E_{кин}$ меньше U_0 , частица, не достигнув вершины, покатится назад, т. е. она отразится от барьера.

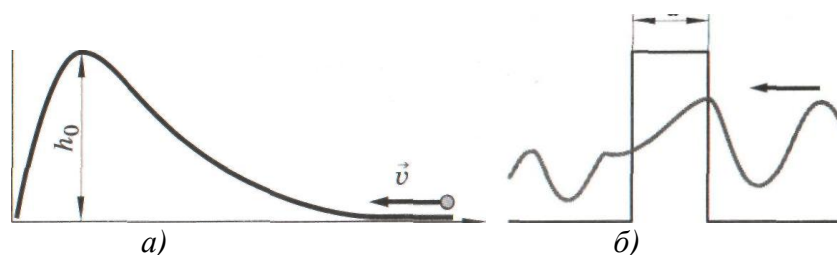


Рис. 1.1. *a* — преодоление потенциального барьера классической частицей; *б* — схема туннельного перехода электрона

Потенциальный барьер может соответствовать любому другому виду потенциальной энергии, например потенциальной энергии заряженной частицы в электрическом поле.

В отличие от классической, квантовая частица, в том числе электрон, проявляя свои волновые свойства, может проходить через преграду - преодолевать потенциальный барьер.

ер, как будто в стенке есть «туннель» (рис. 1.1,б), даже если $E_{кин}$ меньше U_0 . Вероятность такого перехода тем больше, чем «тоньше» барьер и меньше разность между высотой барьера U_0 и кинетической энергией электрона. Это явление связано с корпускулярно-волновой природой квантовых частиц. Частице массой m , движущейся со скоростью v , соответствует длина волны (длина волны де Бройля) $\lambda_0 = 2\pi\hbar/mv$, где \hbar - постоянная Планка. Например, для электрона, имеющего скорость 10^6 м/с (такую скорость он приобретет в вакууме за счет разности потенциалов 3 В), λ_0 составит несколько межатомных расстояний. Если ширина барьера d (см. рис. 1.1, б) меньше или равна λ_0 , тогда есть вероятность перехода частицы через барьер.

Еще одним примером туннельного эффекта является поведение электрона в используемых современной электроникой структурах, подобной изображенной на рисунке 1.2. Но прежде необходимо рассмотреть основные представления зонной теории твердых тел.

В атомах электроны располагаются на определенных орбитах вокруг ядра и могут иметь только те значения энергии, которые соответствуют этим орбитам (рис. 1.3, а). Другие значения энергии запрещены. Когда атомы объединяются в кристалл, их разрешенные уровни энергии объединяются в зоны. В твердых телах электроны могут иметь энергию только в пределах некоторых разрешенных энергетических зон. В самих зонах электроны

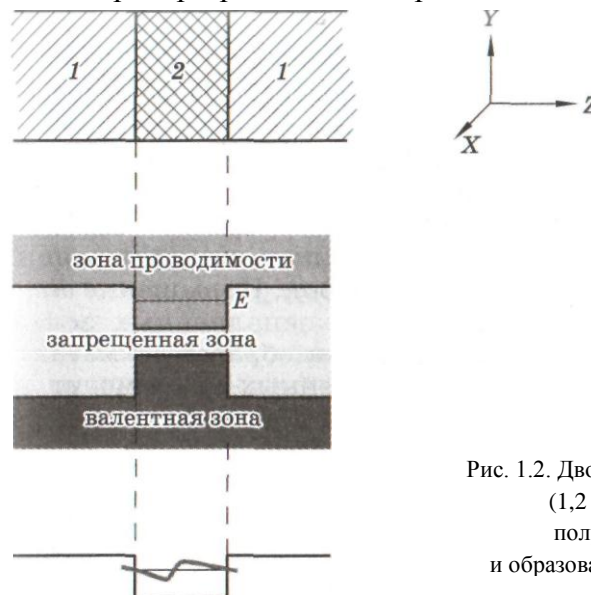


Рис. 1.2. Двойная гетероструктура (1,2 — два разных полупроводника) и образование квантовой ямы

располагаются на определенных уровнях - ступеньках энергетической лестницы. На каждой ступеньке, согласно законам квантовой механики, может находиться не более двух электронов с противоположно направленными *спинами*. Между разрешенными зонами располагаются запрещенные зоны энергии (показаны на рисунке 1.3, б светло-серым цветом), электрон не может иметь энергию, значение которой находится в пределах запрещенной зоны.

Кристаллы являются диэлектриками или проводниками (металлами) в зависимости от того, как заполнены их энергетические зоны.

Металлы отличаются от диэлектриков тем, что в них некоторые зоны заполнены не полностью (рис.1.3,в). В диэлектриках все зоны либо заполненные, либо пустые (рис.1.3,з).

Полупроводники - это частный случай диэлектриков: при 0 К у них тоже все зоны либо заполненные, либо пустые, но, в отличие от диэлектриков, в полупроводниках уже при

комнатной температуре некоторые электроны за счет теплового движения частично освобождают заполненные зоны, переходя в пустые.

Если в твердом теле, помещенном в электрическое поле, возник электрический ток, то средняя кинетическая энергия осуществляющих ток электронов должна повышаться, поскольку направленное движение электронов накладывается на их беспорядочное тепловое движение. Ситуация похожа на направленное (под влиянием ветра) движение роя мошек, продолжающих беспорядочно кружиться внутри роя. Повышение энергии возможно лишь в частично заполненных зонах, где есть свободные уровни. Таким образом, в металле электроны в не полностью заполненных зонах могут, не покидая свою зону, осуществлять направленный перенос заряда.

Электроны в полностью заполненной зоне не могут повышать свою энергию, так как это означает подняться на следующую ступеньку энергетической лестницы, а в валентной зоне они все уже заняты другими электронами. Для того чтобы «перепрыгнуть» через запрещенную зону в следующую, свободную зону, нужна достаточно большая энергия. Поэтому диэлектрики ток не проводят.

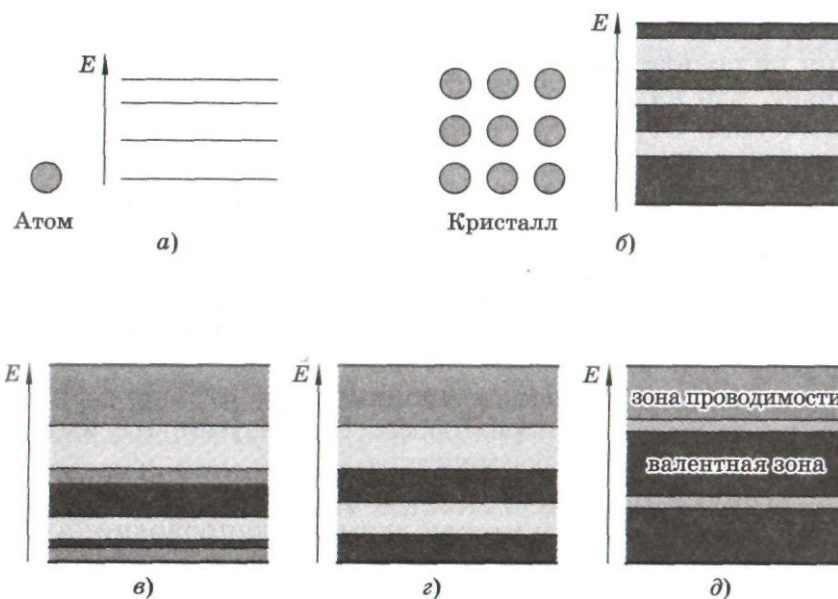


Рис. 1.3. Энергетические спектры:

а - отдельного атома; *б* - кристалла (общий случай) - электроны могут иметь энергию только на уровнях внутри разрешенных зон; *в* - металла: одна из разрешенных зон заполнена электронами не полностью; *г* - диэлектрика: все разрешенные зоны либо заполнены полностью, либо пустые; *д* - полупроводника: последняя полностью заполненная зона называется валентной, следующая разрешенная зона - зоной проводимости

В полупроводниках последняя по величине энергий зона, ступеньки которой при 0 К все заполнены электронами, называется валентной (рис. 1.3, *д*). Выше нее располагается запрещенная зона. Следующая разрешенная зона называется зоной проводимости, и при 0 К в ней электронов нет. Особенностью полупроводников по сравнению с диэлектриками является сравнительно узкая запрещенная зона. За счет энергии теплового движения часть электронов может ее преодолеть и оказаться в зоне проводимости. Ситуация похожа на испарение жидкости, когда самые быстрые молекулы могут покинуть ее поверхность и перейти в воздух. Электроны полупроводника в зоне проводимости могут направленно двигаться в электрическом поле, создавая ток.

При переходе электрона в зону проводимости в валентной зоне остается вакантное место, которое называют *дыркой*. Отсутствие отрицательного заряда можно рассматривать как положительный заряд, поэтому дырки двигаются в электрическом поле в другую сторону по сравнению с электронами. Фактически \bar{e} означает, что наличие дырки (вакантного места на энергетической ступеньке) позволяет другому электрону из валентной зоны перескочить на эту ступеньку участвовать в направленном переносе заряда (электрическом токе).

У разных полупроводников ширина запрещенной зоны разная, контакт таких полупроводников изображён на рисунке 1.2. Контакт двух различных полупроводников называют **гетеропереходом**. **Гетероструктурой** называют полупроводниковую структуру с несколькими гетеропереходами. На рисунке 1.2 изображена двойная гетероструктура.

Тонкий слой полупроводника 2 с узкой запрещенной зоной помещен между двумя полупроводниками 1 с широкой запрещенной зоной. Электрон в полупроводнике 2 может свободно двигаться в плоскости XU если его энергия E соответствует зоне проводимости. Однако его энергии может оказаться недостаточно для преодоления потенциальных барьеров слева и справа: в полупроводниках 1 это будет для него запрещенная зона. Таким образом, движение электронов в полупроводнике 2 по оси Z ограничено потенциальными барьерами в то время как в перпендикулярной плоскости XU они движутся свободно, образуя так называемый двумерный электронный газ. Такую структуру - с ограничением движения в одном из трех направлений - называют **квантовой ямой** (*quantum well*). Можно ограничить движение электронов еще в одном измерении и получить **квантовые нити** (квантовые проволоки). Носители заряда, электроны и дырки, смогут перемещаться только вдоль квантовой нити. Продолжая эту идею и ограничив движение носителей «со всех сторон», мы получим **квантовую точку** (*quantum dot*). Как выразился один из известных исследователей в этой области, то, что является трехмерной квантовой ямой для электрона, представляет собой квантовую точку (наноразмерное скопление атомов) для человека.

В классической механике энергия частицы в потенциальной яме может принимать непрерывный ряд значений. Теннисный мяч, упавший в реальную яму на земле, может прыгать в ней на любую высоту. Для частицы в трехмерной квантовой яме, подчиняющейся законам квантовой механики, существует дискретный набор уровней энергии, как для электрона в атоме. Поэтому квантовые точки называют искусственными i атомами. Число уровней энергии зависит от ширины потенциальной ямы, ее глубины и массы частицы.

Благодаря туннельному эффекту находящийся в потенциальной яме; электрон можно обнаружить и за ее пределами, хотя его энергия меньше «глубины» ямы.

Туннельный эффект широко используется в современной нанoeлектронике. За разработку метода туннельной спектроскопии Нобелевская премия по физике 1973 г. была присуждена Л. Эсаки, А. Джайверу и П. Д. Джозефсону.

Основные» принципы СТ микроскопии

Рассмотрим туннельный эффект применительно к сканирующей туннельной микроскопии (СТ микроскопия). Сама идея использования туннельного эффекта для зондирования поверхности достаточно проста. Тонкое металлическое острие (зонд) подводится к проводящей поверхности (рис. 1.4, *a*). Между ней и зондом существует небольшое напряжение (от 0,01 до 10 В). Благодаря туннельному эффекту, ток в цепи будет идти даже при отсутствии полного контакта зонда с поверхностью. Чем меньше зазор (потенциальный

барьер) между зондом и поверхностью, тем больше туннельный ток (рис. 1.4, б). Вначале, с помощью системы грубого позиционирования, зонд подводится на расстояние около 10 А, что позволяет зафиксировать силу туннельного тока порядка 10^{-9} ампер. При дальнейшем приближении зонда к поверхности туннельный ток резко возрастает. Высокая точность измерений ширины зазора между зондом и поверхностью определяется экспоненциальной зависимостью силы туннельного тока от расстояния (изменение зазора на 1А приводит к увеличению силы тока примерно в 10 раз). Следовательно, перемещая зонд горизонтально над поверхностью, можно по силе тока получить данные по ее топографии. Другой возможный режим работы - проводить зонд над поверхностью так, чтобы сохранялась величина туннельного тока. Для этого надо зонд с помощью компьютерной программы соответственно опускать и приподнимать над поверхностью, тем самым фиксируя ее топографию.

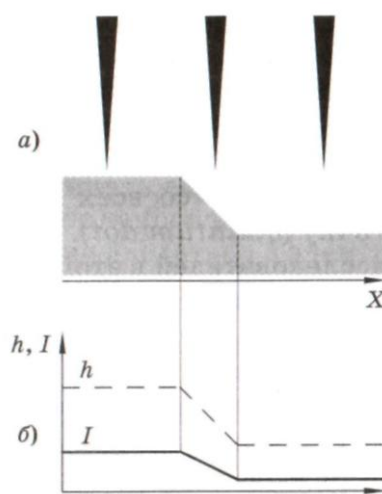


Рис. 1.4. а - схема работы сканирующего туннельного микроскопа; б - график зависимости высоты сканируемой поверхности и силы туннельного тока I от координаты

Для реализации этой идеи следовало решить ряд сложных технических проблем. Прежде всего, перемещение зонда по вертикальной оси Z , так же как сканирование поверхности (перемещение по осям X и Y), и будет уникальной точности. Это стало возможным только после создания в 1966 г. специальных *пьезодвигателей* с обратной связью (Р. Янг). Пьезодвигатели позволяют перемещать зонд горизонтально на расстоянии от долей



Генрих Рорер

ангстрема до одного микрона, а по вертикали в рабочем режиме, когда уже зафиксирован туннельный ток, примерно на 0,1 А. Напомним, что среднее расстояние между атомами в кристалле составляет

Далее - прибор следует обезопасить от вибраций (современные сканирующие микроскопы имеют осов-ВК) подвеску) и электромагнитных наводок.

И наконец, очень важно выдержать точную форму зонда, тем более что радиус его закругления на конце должен быть



Герд Биннинг

нанометровым, часто он заканчивается единичным атомом. При этом локальные электрические поля под зондом сравнимы по величине с внутриатомными.

В ноябре 1978 г. сотрудники швейцарского отделения компании «IBM» Г. Биннинг и Г. Рорер начали работу над прибором и в марте 1981 г. продемонстрировали его результативность. СТМ позволял «видеть» отдельные атомы. На рисунке 1.5 приведено знаменитое изображение поверхности кремния, подтвердившее работоспособность СТМ.

Известно, что расположение атомов на поверхности кристалла отличается от их расположения внутри. Внутренние межатомные связи идеального кристалла насыщены, и его структура соответствует наименьшей энергии. На свободной поверхности такое же расположение атомов приводит к возникновению оборванных связей, что делает структуру неравновесной. Поэтому требуется так называемая реконструкция поверхности, когда атомы на поверхности складываются в другой «вор», что энергетически выгоднее. До создания СТМ предшествовало много противоречивых моделей структуры поверхности кремния, хотя предварительные данные показали, что в кристаллической ячейке на поверхности содержится 49 атомов. Полученные результаты сделали методику исследования поверхности с помощью СТМ общепризнанной, и создатели Г. Биннинг и Г. Рорер получили в 1986 г. Нобелевскую премию вместе с Э. Руска, создавшим в 30-х гг. несколько приборов - прообразов электронного микроскопа. Это был непривычно короткий срок между открытием и его мировым признанием.

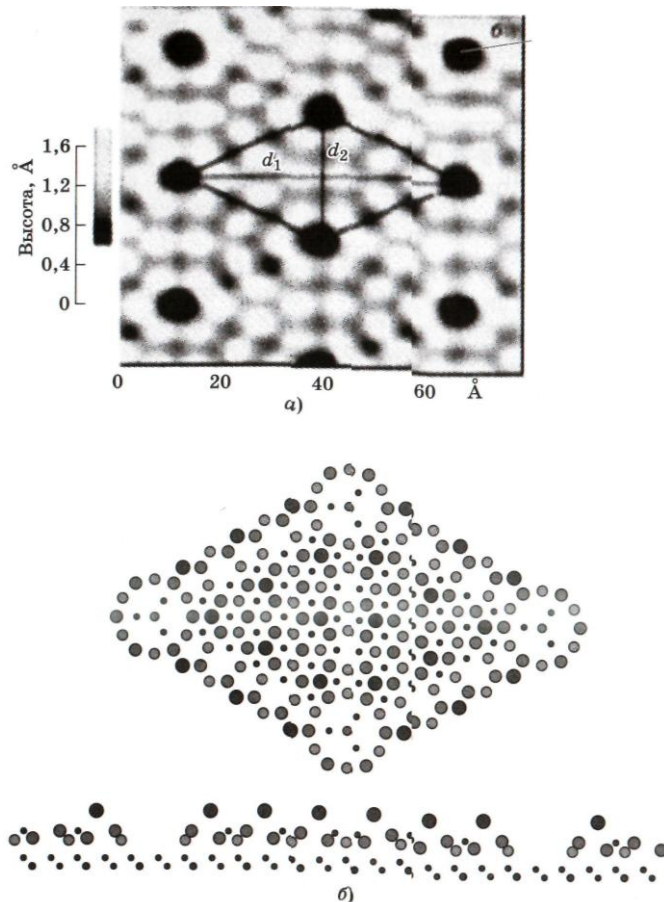


Рис. 1.5. Реконструкция поверхности кремния: а – изображение получено с помощью СТМ Г. Биннингом и Г. Борером; б – схема атомной структуры поверхности (вид сверху, вид сбоку)

АСМ и его возможности

В 1986 г. Г. Биннинг с сотрудниками создал атомно-силовой микроскоп (АСМ), обладающий рядом преимуществ по сравнению с СТМ. В отличие от СТМ, пригодного для исследования только проводящей поверхности ГИ в условиях вакуума, АСМ позволил изучать поверхность диэлектрика не только в атмосфере, но и в любом газе, и даже покрытую слоем жидкости. Открылась возможность исследовать такие природные нанобъекты, как вирусы и гены. Специальные методы позволяют изучать даже жидкости и отдельные капли. Действие АСМ основано на измерении не туннельного тока, а силы взаимодействия между атомами зонда и атомами поверхности.

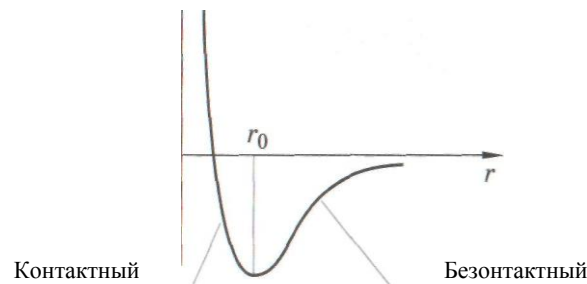


Рис. 1.6. Области энергии взаимодействия зонда АСМ с поверхностью при двух режимах работы (U — энергия взаимодействия, r — расстояние между зондом и поверхностью образца)

Возможны два режима работы АСМ: 1) контактный, когда зонд прижимается к образцу и его отклонение вызвано силами отталкивания между атомами острия зонда и поверхности; 2) более щадящий для объекта исследования бесконтактный режим, когда расстояние между зондом и образцом составляет 5 - 10 нм и фиксируются силы притяжения. Общий вид зависимости энергии взаимодействия U двух атомов от Расстояния r между ними представлен на рисунке 1.6. Слева от точки r_0 преобладают силы отталкивания, справа - силы притяжения. Таким образом, при первом режиме работы АСМ взаимодействие зонда с поверхностью соответствует левой части кривой $U(r)$, при втором - правой части.

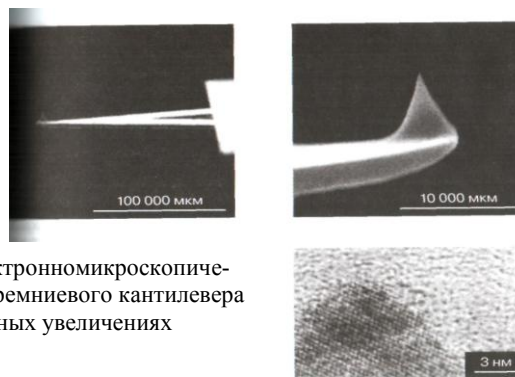


Рис. 1.7. Электронномикроскопические снимки кремниевого кантилевера при разных увеличениях

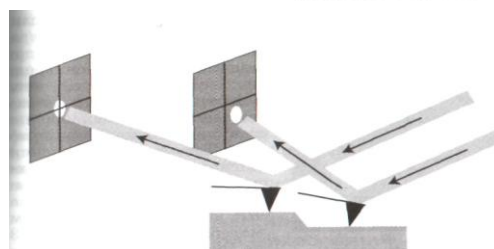


Рис. 1.8. Схема смещения луча лазера, отраженного от зеркальца кантилевера, при наклоне последнего во время движения по рельефу поверхности

Важной деталью АСМ и других сканирующих микроскопов является **кантилевер** (от англ. *cantilever* - балка). Он представляет собой чип - пластинку из *легированного* кремния миллиметровых размеров, из торца которой торчит балочка, заканчивающаяся собственно зондом, предельно тонким (рис. 1.7). В качестве зонда может использоваться углеродная нанотрубка.

Смещения кантилевера определяются по отклонению луча полупроводникового лазера, который падает на самый кончик кантилевера, покрытый алюминиевым напылением-зеркальцем. Отклонения луча фиксируются многосекционным *фотодиодом* (рис. 1.8).

В электронную схему микроскопа входит специальная система обратной связи, которая связана с системой отключения кантилевера и обеспечивает заданный режим сканирования. Работа всех сканирующих микроскопов управляется компьютером, также компьютеры обработке подвергаются результаты сканирования специальной программе, позволяющей получить изображение поверхности.

Идея зондовой микроскопии оказалась очень плодотворной. Появились сканирующие микроскопы, фиксирующие локальные магнитные поля на поверхности локальные тепловые, электрические поля и пр. Активно развивается оптическая сканирующая микроскопия ближнего поля, которая позволила преодолеть *дифракционный предел* в оптике. За сравнительно короткий период времени метод зондовой микроскопии став одним из самых востребованных в области не только в физики и химии, но также медицины и биология (рис. 1.9).

Для регистрации магнитных или электрических полей вблизи исследуемой поверхности предварительным сканированием исследуется рельеф поверхности точным замером высоты неровностей. После этого зонд, чувствительный к данному полю, программно проходит на заданном расстоянии над поверхностью по уже известному рельефу. Если отклонений кантилевера не наблюдается, значит, дополнительных неоднородных силовых



Рис. 1.9. Изображение кишечной палочки, полученной с помощью АСМ [8]

полей нет, в противном случае их можно зафиксировать, используя специальный кантилевер. Так, для определения магнитных полей поверхность кантилевера покрывается тонким (порядка 10^2 нм) ферромагнитным материалом. На рисунке 3 на цветной вклейке приведена *доменная структура* кристалла никеля при двух разных температурах.

В оптическом микроскопе ближнего поля зондом служит оптоволокно, остро отточенное до радиуса кривизны 10 нм. С его помощью определяют оптические свойства поверхности, например, люминесценцию.

По словам исследователей-биологов, визуализация *ДНК*, отдельных вирусов, белков, определение структуры и свойств клеточных мембран из категории экспериментального искусства превращаются в рутинные.

С развитием Интернета появилась возможность дистанционной работы на некоторых микроскопах коллективного пользования. На них выделяется время для работы не только исследователям, но и школьникам.



Рис. 1.10. Надпись «IBM» образована 35 атомами ксенона на поверхности кристалла никеля с помощью сканирующего туннельного микроскопа сотрудником фирмы «IBM» Дональдом Эйглером [11]

Зондовую сканирующую микроскопию называют «глазами и пальцами» нанотехнологии, потому что с ее помощью можно не только наблюдать отдельные атомы и перемещать их (см. рис. 1 на цветной вклейке). За счет приложенного к зонду электрического напряжения отдельные атомы можно «выдергивать» из поверхностного слоя, переносить в другое место и, меняя полярность, снова возвращать в поверхностный слой в нужную точку. Впервые это продемонстрировали сотрудники «IBM», выложившие название фирмы 35 атомами ксенона на поверхности никеля (рис. 1.10). Таким образом, предположение Р. Феймана о возможности манипуляции отдельными атомами подтвердилось меньше чем через 30 лет.

Технологические применения зондовой микроскопии

Вначале СТ и АС микроскопия использовались для решения различных физических, химических и биологических проблем. Сейчас все большую роль играет технологическое воздействие на поверхность для создания элементов нанoeлектроники, запоминающих устройств с *терабитным объемом памяти*. С помощью сканирующего микроскопа можно воздействовать в наномасштабе на поверхность: царапать ее, осуществлять нанолитографию (рис. 1.12, рис. 2 на цветной вклейке).

Локальные электрические поля под зондом сравнимы по величине с внутримолекулярными и атомами, под их влиянием возникают сверхплотные локальные потоки тепла, идут химические реакции. В ближайшие 10 лет ожидается резкий прорыв зондовой технологий.

Сканирующие зондовые микроскопы широко и пользуются для текущего, неразрушающего контроля различных технических изделий, таких как CD и DVD их помощью, в частности, можно по мельчайшим дефектам компакт-диска определить начальную матрицу и выяснить, не является ли она «пиратской». Можно восстановить предыдущую запись, если она не стерта специальным устройством.



Рис. 1.11. Петроглиф племени навахо, полученный с помощью зонда АСМ на титановой пленке

Один из путей увеличения производительности зондовых технологий - создание многозондовых матричных устройств, например «многоножка» (Millipede). Многозондовое нанотехнологическое оборудование должно предусматривать разнообразное воздействие на поверхность т. е. набор различных по функции зондов и соответствующее программное обеспечение.

Таким образом, сканирующие зондовые микроскопы из уникальных научных приборов превратились в широко используемое орудие Hi-Tec-технологий.

В России современные сканирующие микроскопы нанотехнологические комплексы производятся в Зеленограде фирмой «NT-MDT», успешно конкурирующей на мировом рынке с другими производителями. Изображения микроскопов, дополнительный материал по сканирующей микроскопии и скан-галерею можно найти на сайте «NT-MDT», а также в статье [14*].

Вопросы для самопроверки

1. Что такое сканирование? Приведите примеры.
2. Что такое туннельный эффект и какова его природа?

3. Как можно уменьшить длину волны де Бройля для микрочастицы?
4. Как зонная теория объясняет различия между диэлектриками и проводниками? Что такое полупроводники?
5. Что называют гетеропереходом?
6. Чем различаются принципы работы СТМ и АСМ? Что в них общее?
7. Почему строение поверхностного слоя кристалла отличается от его внутренней структуры?
8. Почему сканирующие микроскопы называют «глазами и пальцами» нанотехнологии?

Задания

1. Подготовьте доклад о волновой природе микрочастиц и туннельном эффекте.
2. Подготовьте проект о применении АСМ в биологии и медицине.
3. Оформите стенд о принципах работы сканирующих микроскопов и их возможностях, используя данные сайтов «NT-MDT» (отечественное производство сканирующих микроскопов и комплексных установок, г. Зеленоград) и Physics News Graphics.

Литература

1. Панкратов С., Панов В. Поверхности твёрдых тел // Наука и жизнь. 1986. №5, 6.
2. Делоне Н.Б. Туннельный эффект // СОЖ. 2000. №1.
3. Бахтизин Р.З. Сканирующая туннельная микроскопия – новый метод изучения поверхности твёрдых тел // СОЖ. 2000. №11.
4. Лифшиц В. Г. Современные приложения сканирующей туннельной микроскопии для анализа и модификации поверхности // СОЖ. 2001 №5.
5. Щеглов Д. В. Атомно-силовая микроскопия.
<http://www.nsu.ru/psj/departments/semic/newsheglov/1.html>
6. Коженевский С., Прокопенко С. Методы сканирующей зондовой микроскопии для исследования поверхностей накопителей информации и восстановления данных. ЕПОС.
<http://epos.kiev.ua/pubs/stm.htm>
7. Быков В. А., Лазарев М. И., Саунин С. А. Сканирующая зондовая микроскопия для науки и промышленности // Электроника: наука, технология, бизнес. 1997. № 5. С. 7; Компьютерра. 1997. № 41.
8. Сканирующая зондовая микроскопия биополимеров / под ред. И. В. Яминского. М.: Научный мир, 1997.
9. Алексеев А. М., Попков А. Ф. Измерения при переменной температуре.
<http://www.ур.internet.kemsu.ru>
10. Биннинг Г., Рорер Г. Сканирующая туннельная микроскопия - от рождения к юности // УФН. Т. 154, 1988. Вып. 2. С. 261.
11. Быков В. А. Разработка и освоение производства приборов и оборудования для нанотехнологии // Российские нанотехнологии. Т. 2. 2007. № 1—2. С. 32.

Занятие 3.

Лекция: Нанокластеры, квантовые точки

Кластеры и особенности их свойств

Кластерами называют нанообъекты, состоящие из сравнительно небольшого числа атомов или молекул, т.е. единиц до сотен тысяч. Кластеры имеют наноразмеры по трем направлениям.

В макроскопических образцах одни физические характеристики твердых тел и жидкостей не зависят от объема (строение, температура, плавления и кипения, удельное электрическое сопротивление и др.), другие пропорциональны ему (например, масса, теплоемкость). Свойства макрообъектов, возникающие при большом скоплении атомов и молекул, не просто суммируются из свойств отдельных частиц, а определяются также их коллективным взаимодействием. При небольшом числе атомов, образующих частицу-кластер, свойства ее формируются по-иному. Выяснилось, например, что кластер плавится при существенно более низкой температуре, чем массивное твердое тело, и точки плавления не совпадают с точкой кристаллизации. В некоторых условиях кластеры могут иметь отрицательную теплоемкость: при сообщении некоторого количества теплоты их температура падает за счет перестройки структуры. Кластеры одного и того же металла в зависимости от размеров могут быть диэлектриками, Полупроводниками, проводниками.

Особенности физических и химических свойств кластеров обусловлены прежде всего тем, что в них возрастает роль поверхностных атомов. Для небольших Кластеров практически все атомы оказываются поверхностными, чем объясняется их повышенная химическая активность. Но отличие может быть не только количественным. Например, химическая реакция с одним и тем же реагентом может дать разный результат для обычного металлического порошка и для нанокластеров металла.

Другая общая особенность кластеров, связанная с их размером, упоминалась ранее. Размеры кластеров часто оказываются меньше длин волн, определяющих некоторые коллективные взаимодействия атомов и соответствующие физические свойства, например характер намагниченности или проводимость. В то же время размеры макроскопических тел на много порядков больше этих длин волн, поэтому их физические свойства от размеров не зависят.

Изучение кластеров помогает понять, как формируются свойства макроскопических тел, сколько частиц должно объединиться, чтобы их ансамбль обладал свойствами макроскопических образцов. Физические свойства кластера часто резко зависят от числа атомов в нем, поэтому некоторые исследователи аллегорически называют это число третьей координатой таблицы Менделеева. Верхней границей размеров кластера является такое число атомов, при котором дальнейшее добавление уже не меняет его физических и химических свойств, и кластер можно рассматривать как нанокристаллик. Обычно число атомов в нем достигает нескольких тысяч.

Малые размеры нанокластеров позволяют управлять их физическими свойствами при малых воздействиях. Так, молекулярный оксидно-металлический кластер, размеры которого в 10 тысяч раз меньше толщины человеческого волоса, может оказаться основой молекулярной памяти. Для такой частицы добавление всего одного электрона уже заметно

изменяет его физические свойства (электропроводность, электроемкость).

Использование нанокластеров осложняется их активным тепловым движением: малые размеры делают возможными заметные перестройки их структуры. На рисунке 2.1 изображены разные стадии «танца» нанокластера из 4 атомов цезия и 4 атомов йода в компьютерной редакции (моделировании) реально проведенного уникального эксперимента. Кластер принимает форму куба, кольца, ступеньки лестницы и все промежуточные формы. Все эти превращения осуществляются за счет внутренней энергии хаотического движения ионов, составляющих кластер.

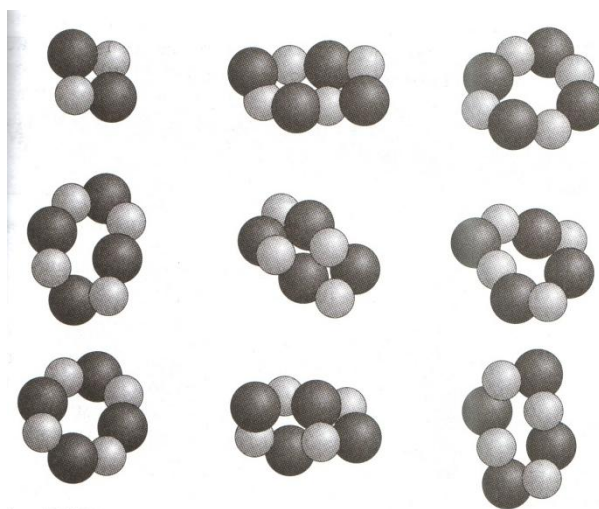


Рис. 2.1. Изменения конфигурации восьмиатомного кластера цезий-йод в процессе теплового движения [10]

Методы получения кластеров.

Магические числа

Обычно кластеры делят на газовые и твердотельные. Газовые кластеры состоят из частиц вещества, которое в обычных условиях является газом. Чтобы получить газовые кластеры, надо резко охладить газ, желательно при высоком давлении.

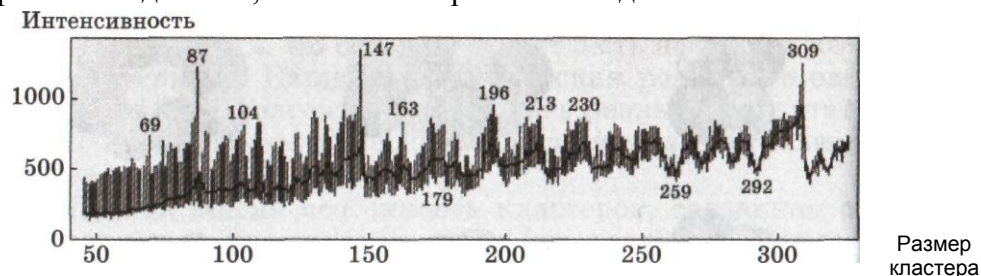


Рис. 2.2. Распределение газовых кластеров криптона по размерам (числу атомов) [1]

Для получения твердотельных кластеров поверхность твердого тела подвергают воздействию лазерного луча или пучка заряженных частиц (электронов, ионов) с большой кинетической энергией. С поверхности материала при этом вылетает некоторое количество макроскопических капель, отдельных частиц и кластеров разного размера. Затем кластеры направляют в специальный прибор - *масс-спектрометр*, позволяющий определить их распределение по массам, т. е. по числу частиц в кластере.

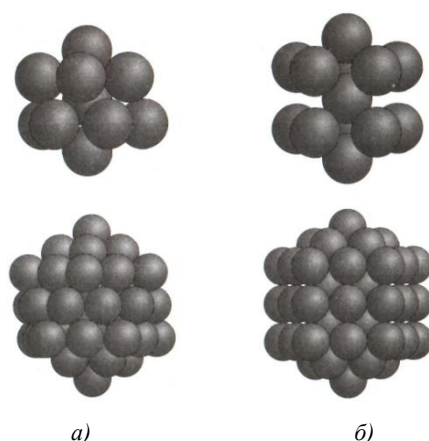


Рис. 2.3. Структура нанокластеров из 13 и 55 атомов: *а* – икосаэдр; *б* - додекаэдр

Оказалось, что чаще всего встречаются кластеры, состоящие из определенного количества частиц. Это означает, что такие кластеры наиболее устойчивы, стабильны. Числа, соответствующие количеству частиц в них, называют **магическими** (рис. 2.2). Магическими, являются числа 69, 87, 104, 147 и т. д. Такие числа позволяют понять, как из отдельных частиц «сложены» кластеры, от самых маленьких до больших. Тем самым можно проследить путь формирования структуры и свойств макроскопического тела, начиная от отдельных атомов и молекул.

Примером структуры устойчивых кластеров служит плотная упаковка одинаковых сфер, при которой они касаются друг друга. Первому магическому числу (13) соответствует сфера, окруженная 12 сферами того же радиуса. В 1694 г. И. Ньютон и его друг, оксфордский математик Д. Грегори, поспорили относительно значения максимального числа касающихся сфер. Только через 180 лет Р. Хоппе доказал строго, что оно равно 12. К проблеме «целующихся» кругов и сфер в 1936 г. вернулся нобелевский лауреат, открывший изотопы, Ф. Содди публикации «Научные стансы. Поцелуй по расчету» В журнале «Nature».

Если последующие оболочки из частиц также полностью заполнены, это соответствует числу частиц (магическим числам) 55, 147, 309, 567. Число частиц N_n в n -й оболочке можно подсчитать по формуле

$$N_n = 10n^2 + 2$$

Таким образом, если в первой оболочке вокруг одного атома находится 12 атомов и магическое число равно 13, во второй оболочке находится 42 атома. Добавляя 42 к 13, получаем магическое число 55 и т.д.

Структура кластера при этом оказывается наиболее стабильной, а кластер имеет структуру *икосаэдра* (рис. 2.3, *а*).

В некоторых случаях кластеры «упаковываются» из частиц, образуя структуру *додекаэдра* (рис. 2.3, *б*). Набор магических чисел при этом: 7, 29, 66, 118 и т. д.

Исследование магических чисел для углерода привело к открытию фуллеренов и углеродных нанотрубок. Изучение магических чисел некоторых твердотельных кластеров помогает понять природу магнитных свойств вещества. В последние годы получены нанокластеры сложного состава, из многоатомных молекул.

Квантовые точки

Роль процессов самоорганизации

Кластеры нашли широкое применение, прежде всего в электронике. Один из наиболее популярных объектов - вид кластеров, которые называют квантовыми точками. На их основе разработаны технологии нового поколения полупроводниковых приборов, лазеров, диодов, ячеек солнечных батарей и пр.

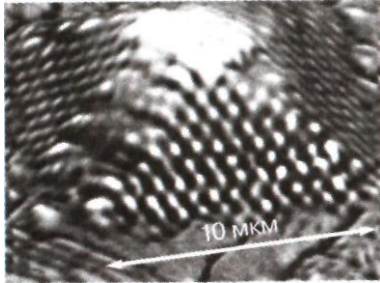


Рис. 2.4. Квантовая точка, изображение в атомносиловом микроскопе

Квантовые точки представляют собой регулярные «островки» одного полупроводника на поверхности другого, близкого по составу и структуре, и служат **трехмерными квантовыми ямами** для электронов. Например, на поверхности арсенида галлия GaAs выращивают квантовые точки из арсенида индия In As.

Полупроводниковые квантовые точки имеют размер в несколько десятков нанометров и содержат тысячи и сотни тысяч атомов (рис. 2.4, 2.5). Дискретность энергетического спектра электрона в квантовой яме позволяет называть квантовые точки «искусственными атомами». Такое сопро-

тивление иллюстрируется рисунком 2.6.

На основе технологии создания квантовых точек были разработаны миниатюрные источники света с высоким коэффициентом полезного действия. Квантовые точки поглощают лазерное излучение в ультрафиолетовом диапазоне и переизлучают его уже в I видимом диапазоне с высоким коэффициентом полезного действия (55%), значение которого предполагается увеличить почти до 100%. Следующий шаг - замена лазерного источника питания обычным источником тока. Варьируя размеры и состав квантовых точек, можно получать светодиоды с разным цветом излучения.

В полупроводниковых устройствах микроэлектроники регулируется (включается или выключается) ток, соответствующий потоку из сотен тысяч электронов. В нанoeлектронике с помощью квантовых точек можно управлять движением одиночных электронов, что открыло огромные возможности по дальнейшей миниатюризации полупроводниковых устройств и снижению их энергопотребления. Открылись новые возможности для развития *криптографии*.

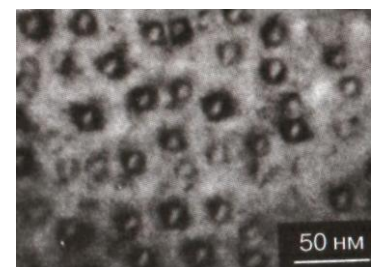


Рис. 2.5. Изображение квантовых точек InAs в матрице GaAs (вид сверху), полученное с помощью просвечивающей электронной микро-

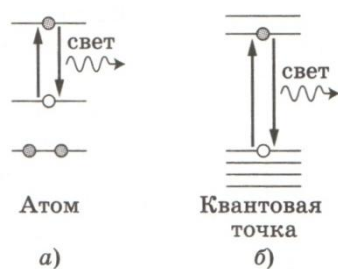


Рис. 2.6. Механизм излучения: а — индивидуального атома; б — квантовой точки — «искусственного атома»

Успешно разрабатываются газоразрядные источники света на основе кластеров тугоплавких металлов (вольфрам, молибден) с интенсивностью, намного превышающей интенсивность атомных газоразрядных источников.

Решая задачу создания квантовых точек, сотрудники лаборатории Ж. И. Алферова пришли к выводу о необходимости использования процессов *самоорганизации* на новом уровне, тщательно их изучая и творчески используя. В про-

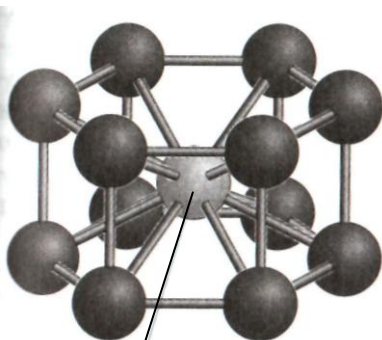
цессах выращивания бездефектных квантовых точек были использованы даже дефекты - истонченные «враги» этого процесса, возникающие при совмещении двух полупроводников с различным межатомным расстоянием. Н. Н. Ледендов в популярном докладе в лектории Физико-технического института РАН выразил это так: «Стало ясно, что не нужно пытаться бороться с природой, а надо эту природу изучать, радоваться ей и просто следовать тому, что она сама хочет сделать. А сама она как раз очень хочет сделать наноструктуры, правда, размеры, плотности, относительное расположение нанообъектов она хочет определять сама». Так была сформулирована новая *парадигма* отношения к росту полупроводниковых кристаллов - переход к самоорганизующимся наноструктурам.

Переходу от традиционных технологических процессов «сверху вниз» к самосборке в процессах «снизу вверх» вполне соответствует вольная трактовка цитаты из книги Макса Фрая «Ворона на мосту»: «Очевидная магия - грубое насилие над реальностью, тогда как Истинная магия - исполнение ее тайных, невысказанных желаний». Заметим к месту, что, по словам Артура Кларка, известного писателя-фантаста, любая развитая технология неотличима от магии.

Ранее считалось невозможным вставить в полупроводник слой из другого материала так, чтобы граница между разными материалами одновременно была и достаточно резкой, и бездефектной. Ж. И. Алферов и его коллеги показали, что эта проблема решаема, и преимущества, ожидаемые для «идеальных» гетероструктур, реализуются на практике [2].

Например, при получении квантовых точек на поверхности арсенида галлия (GaAs) возвращают слои арсенида индия (InAs), в кристаллической решетке которого расстояния между отдельными атомами несколько отличаются от расстояний в GaAs. Из-за этого в первом же слое осажденного InAs возникают упругие напряжения, а при достижении определенной толщины кристалл InAs теряет устойчивость и сам распадается на множество практически одинаковых островков. Так «одним ударом» получается множество квантовых точек.

Получение близких по размеру нанокластеров, чтобы затем наполнить ими твердую среду (матрицу) или нанести на макроскопическую поверхность, является важной технологической задачей. Подобные задачи возникают и при вкраплении магнитных наночастиц в какую-то среду с другими магнитными свойствами, и при создании излучающих наночастиц серебра на полимерной подложке, полупроводниковых квантовых точек и т. п. Во всех этих случаях необходимо совместить массовое производство с атомной точностью формирования структуры. Задача нанотехнологии заключается в разработке такого процесса, в котором желаемый продукт получается естественным путем самоорганизации.



Атом вольфрама

Рис. 2.7. Кластер из 12 атомов кремния и так называемого «гостя» - атомы вольфрама [39*]

Методы модификации свойств кластеров

Физические и химические свойства кластера можно целенаправленно изменять, вводя в него атомы других элементов. На рисунке 2.7 изображен кластер из двенадцати атомов кремния, окружающих атом вольфрама. Подобные кластеры считаются перспективными для получения эффективных катализаторов, для использования в квантовых компьютерах и пр. «Играть» свойствами кластеров можно также за счет

их взаимодействия друг с другом или со средой, в которой они находятся.

В нанокompозитах нанокластеры используются как наполнитель основной среды (матрицы), в качестве которой часто выступает полимерный материал. Взаимодействие наночастиц наполнителя друг с другом и с матрицей существенно определяет механические, электрические, тепловые и другие свойства композита.

В катализе наноструктуры использовались давно. Часто кластеры металла помещают на подложку-носитель (оксидные, углеродные материалы). Такие катализаторы участвуют в крупнотоннажном производстве углеводородного сырья, органическом синтезе и пр. И в этом случае проявляются основные особенности кластеров:

- резкое отличие их свойств, в том числе каталитической активности, от свойств отдельных атомов и микроскопических частиц. Каталитическая активность при этом может расти вместе с увеличением числа атомов в кластере или уменьшаться;
- взаимодействие кластеров между собой и с подложкой. Эксперименты показывают, что каталитическая активность и электрические свойства такой системы зависят от перераспределения электрического заряда между кластерами и подложкой. Электроны и дырки могут перемещаться в результате туннельного эффекта, если расстояние между кластерами или кластерами металла и проводящей подложкой составляет) 1-2 нм;
- склонность к самоорганизации за счет взаимодействия отдельных кластеров металла (например, Co) между собой (см. рис. 3.7).

Области применения кластеров

Кроме электроники одной из важнейших областей применения нанокластеров является медицина, прежде всего диагностика. Характерное свойство нанокристаллов полупроводников - интенсивная люминесценция в ответ на облучение с определенной частотой - оказалось незаменимым при диагностировании раковых опухолей. Поскольку при росте опухоли создаются дополнительные кровеносные сосуды и система этих сосудов очень пористая и разветвленная, нанокристаллики накапливаются в основном в них, и люминесцентное излучение пораженных участков существенно сильнее, чем здоровых. Такой процесс визуализации злокачественного образования называют пассивным. Другой путь - активный - использует нанокластеры, химически связанные с биологическими молекулами типа антител, пептидов, белков или ДНК. В этом случае нанокластеры активно накапливаются именно в опухоли, фиксируя ее местоположение.

Для создания таких нанокластеров обычно используются соединения атомов элементов II и VI групп таблицы Менделеева (условно такую молекулу определяют общей формулой A_nBVI) или атомов элементов III и V групп (A_nBV). Можно управлять формой квантовых точек, получать наностержни и более сложные фигуры.

Для анализа биологических объектов обычно используются органические флюоресцирующие вещества. Флюоресцентные полупроводниковые нанокристаллы по ряду свойств оказались лучше. У них большая яркость и узкое распределение по частотам излучения. Так, свечение кластеров селенида кадмия (CdS), защищенных моноатомным слоем селенида цинка ZnS , в 20 раз ярче, чем свечение органических красителей-люминофоров, а стабильность во времени выше в 100-300 раз. С их помощью можно длительное время наблюдать процессы в биологической системе.

Важно, что частота излучения квантовой точки зависит от ее размеров. При этом возбуждать квантовые Точки можно одним и тем же источником света. Размерами кластеров можно управлять в процессе их получения с помощью температурного режима или времени роста.

Например, кластеры селенида кадмия размером от 8 до 6 нм излучают в диапазоне, начиная от видимого голубого до инфракрасного. При этом возбуждать квантовые точки можно одним и тем же источником света, в частности ртутной лампой.

Разработан метод лечения с использованием магнитного поля, действие которого вызывает достаточно сильный разогрев активных нанокластеров, и связанные с ними раковые клетки погибают без вреда для клеток здоровых.

Кроме медицины и электроники, нанокластеры получили широкое промышленное применение в производстве принципиально новых материалов и покрытий, в парфюмерии.

Особый интерес представляет применение в парфюмерии и медицине наночастиц серебра и золота [8]. Причиной этого является химическая инертность благородных металлов в массивных образцах и вместе с, тем особенности их участия в обмене веществ в живом организме.

В течение многих веков золото и серебро использовались для лечения и профилактики болезней. В Индии примерно три тысячи лет назад применяли золотосодержащие эссенции из масел и растительных экстрактов. В Древней Греции смесью золотого порошка и чеснока лечили грипп. Ко дворам королей Польши и Пруссии поставляли «Солнечный эликсир», содержащий лекарственное золото. Серебряная посуда и приборы традиционно рассматривались как защита от кишечных заболеваний. В XX в. коллоидное золото использовали для лечения многих воспалительных процессов.

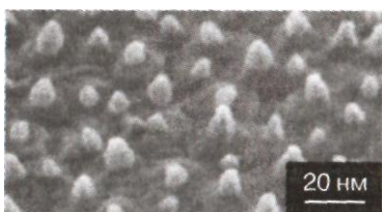


Рис. 2.8. «Микрокочки» на листе лотоса [Компьютера,

кочками» (рис. 2.8), послужил образцом для создания самоочищающегося стекла: капли воды больше таких «нанопупырышков» и остаются лежать на них, не растекаясь по стеклу и не смачивая его. Внешне стекло остается прозрачным. Такое покрытие может быть также использовано в микроустройствах для уменьшения трения.

Форма некоторых нанокластеров удивительно напоминает цветы, деревья, шишки (рис. 2.9, 2.10), что подтверждает единство процессов самоорганизации в неживой и живой природе.

Для получения нанокластеров и материалов на их основе используются разнообразные физические, химические и физико-химические методы.

Нанокластеры из оксида цинка имеют уникальное свойство поглощать электромагнитное излучение в широкой области частот - от радиочастот до ультрафиолета. Их можно использовать в солнцезащитных кремах, очках и для создания «невидимых» покрытий.

Для нанотехнологии в целом характерно использование «достижений» живой природы, сформировавшихся за миллионы лет эволюции.

Лист лотоса, покрытый «микро-

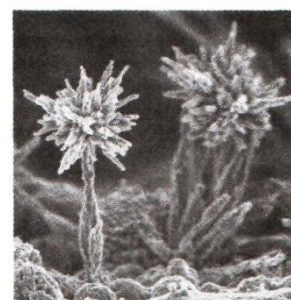


Рис. 2.10. «Наноцветы» [39*]

Вопросы для самопроверки

1. Что такое кластер? В чем особенности физических свойств кластеров?
2. Как получают нанокластеры?
3. Что такое магические числа?
4. Что такое квантовые точки и почему их называют «искусственными атомами»?
5. Как можно варьировать физические свойства нанокластеров?

Задания

1. Оформите стенд о работе школы академика Ж. И. Алферова по гетероструктурам и квантовым точкам. Особо выделите роль процесса самосборки (самоорганизации).
2. Сделайте доклад о структуре и тепловом движении кластеров и продемонстрируйте соответствующие мини-фильмы, пользуясь материалами сайтов <http://www.aip.org/png/2001/134.htm>, <http://science.rambler.ru/db/msg.html?mid=1193089>.
3. Используя статью Э. Г. Ракова «Микробы на службе нанотехнологии» (<http://him.lseptember.ru/2004/07/1.htm>), подготовьте конференцию о свойствах наночастиц золота, их применении в медицине и парфюмерии, образовании наночастиц золота в растениях и бактериях.
4. Подготовьте макеты кластеров разных размеров из одинаковых (например, пластиковых) шариков для демонстрации смысла магических частиц.

Литература

1. Елецкий А. В. Экзотические объекты атомной физики // СОЖ. 1999. №4.
2. Леденцов Н. Н. Наноструктуры: как это делает природа // Лекторий науч. образов. центра ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 2000.
3. Демиховский В. Я. Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое // СОЖ. 1997. № 5.
4. Шик А. Я. Квантовые нити // СОЖ. 1997. № 5.
5. Кубальчинский В. А. Полупроводниковые квантовые точки // СОЖ. 2001. №4.
6. Карпович И. А. Квантовая инженерия: самоорганизованные квантовые точки // СОЖ. 2001. № 11.
7. Олейников В. А., Суханова А. В., Набиев И.Р. Флуоресцентные полупроводниковые нанокристаллы в биологии и медицине // Российские нанотехнологии. Т. 2. 2007. № 1 - 2. С. 160-173.
8. Раков Э.Г. Микробы на службе нанотехнологии. <http://him.lseptember.ru/2004/07/1.htm>

Занятие 4.

Лекция: Магнитные кластеры и нанослои

Природа магнетизма

Магнитные кластеры представляют особый интерес в связи с развитием нанoeлектроники. Исследование магнитных кластеров, переходной ступеньки от атомов к макроскопическому телу, позволяет понять, как формируются его магнитные свойства из магнитных свойств отдельных атомов.

Магнитные явления в веществе имеют квантовую природу. Если бы в природе не было квантовых явлений, не существовало бы магнетизма во всех его проявлениях. Последствия этого трудно себе представить в полной мере.

У электронов есть особая квантовая характеристика - *спин*, определяющая его механический и магнитный момент и принимающая значения $+1/2$ и $-1/2$. Спины электронов в атоме складываются и определяют суммарный магнитный момент, который может оказаться как нулевым, так и отличным от нуля.

Суммарным магнитным моментом обладают также ядра атомов, образованные протонами и нейтронами.

Другой элементарный магнитный момент связано круговым движением электрона вокруг ядра. Он возникает аналогично магнитному моменту замкнутого контура по которому течет ток. На первый взгляд природу этого магнитного момента можно объяснить в рамках классической физики. Однако следует вспомнить, что само по себе устойчивое движение электронов вокруг ядра - эффект квантовый.

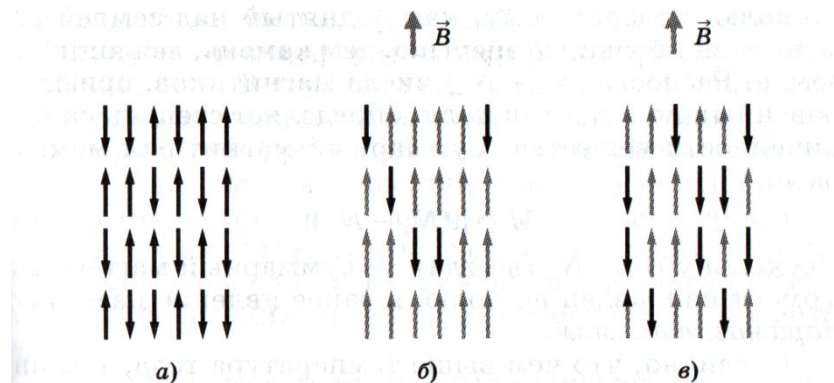


Рис. 3.1. Изменение ориентации атомных магнитных моментов парамагнетика под действием магнитного поля: а - магнитные моменты в отсутствие магнитного поля; б, в - система магнитных моментов в присутствии магнитного поля (в соответствии с более высокой температурой)

В макроскопических телах магнитные свойства отдельных атомов проявляются сложным образом, они не просто складываются.

Внешнее магнитное поле с магнитной индукцией стремится упорядочить элементарные магнетики - магнитные поля атомов или электронов - в твердом теле, выстроить их по полю так, чтобы энергия системы была наименьшей. Если бы не было теплового движения, то все элементарные магнетики были бы ориентированы по полю (рис. 3.1, а) и суммарный магнитный момент был бы максимально возможным и равным

$$M = \mu N, (1)$$

где μ - элементарный магнитный момент одного магнетика, N - количество магнетиков, равное числу атомов.

Одинаково из-за беспорядочного (теплового) движения атомов магнетики имеют дополнительную кинетическую энергию, способствующую их перемешиванию. Таким образом, некоторые магнетики оказываются ориентированы против поля (рис. 3.1, б, в). Они имеют большую потенциальную энергию, чем выстроившиеся по полю, подобно тому, как поднятый над землей камень имеет большую энергию, чем камень, лежащий на земле. Разность (N_+ - N_-) числа магнетиков, ориентированных по и против поля, определяет степень намагниченности вещества. Суммарный магнитный момент равен

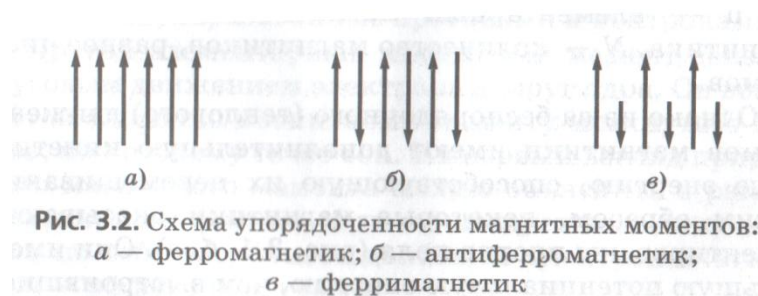
$$M = \mu(N_+ - N_-) \quad (2)$$

Поскольку $N_+ > N_-$ (всегда), то суммарный магнитный момент направлен по полю, и такое явление называют *парамагнетизмом*.

Очевидно, что чем выше температура тела, тем интенсивнее тепловое движение, разрушающее порядок построения магнетиков по полю, больше N_- и меньше результирующая намагниченность (см. рис. 3.1, б, в).

Магнитные моменты, связанные с движением электронов вокруг ядра, - орбитальные моменты - проявляют себя во внешнем поле иначе. Возникает эффект, аналогичный электромагнитной индукции при внесении кругового тока в магнитное поле. Индуцированный магнитный момент всегда направлен прот и в поля, и твердое тело демонстрирует суммарную намагниченность с моментом, направленным против внешнего магнитного поля и не зависящим от температуры. Это явление называют **диамагнетизмом**.

Самым сложным образом ведут себя элементарные магнитные моменты в некоторых твердых телах, в которых возникает магнитная упорядоченность без внешнего магнитного поля. За счет особого внутреннего обменного взаимодействия, также описываемого только квантовой физикой, соседние магнетики могут ориентироваться в одну сторону, как в *ферромагнетике* (рис. 3.2, а), или в противоположную, как в антиферромагнетике и ферримагнетике (рис. 3.2, б, в). В двух последних случаях соседние противоположно направленные магнитные моменты компенсируют друг друга целиком или частично. Их взаимодействие заменяет внешнее магнитное поле, и процесс самоорганизации аналогичен самоорганизации атомов в кристалле. Только самоорганизация атомов в кристалле приводит к позиционной упорядоченности, а самоорганизация магнитных моментов - к ориентационной.



Упорядоченность магнитных моментов за счет внутреннего поля также разрушается тепловым движением. При некоторой температуре, которую называют **температурой Кюри** (T_k), порядок полностью разрушается. При температурах выше T_k упорядоченность может возникать только за счет внешнего поля, твердое тело при этом является парамаг-

нетиком.

В реальном макроскопическом кристалле из соображений минимальности общей энергии магнитная структура распадается на отдельные области, *домены*, в каждом из которых направление магнетиков одинаково. При помещении кристалла во внешнее магнитное поле границы доменов смещаются. На рисунке 3 цветной вклейки приведены фотографии магнитных доменов, полученных с помощью магнитного сканирующего микроскопа. Наличие доменной структуры осложняет проявление магнитных свойств, делает их менее прогнозируемыми.

Магнитные свойства кластеров

Малые размеры кластера могут не позволить реализоваться специфическому обменному взаимодействию, и выстраивающему магнитные моменты в определенном порядке, и тогда магнитные свойства этих нанообъектов будут качественно отличаться от свойств такого же по составу макроскопического тела. Действительно, кластеры классического ферромагнетика - железа при комнатной температуре оказались парамагнетиками.

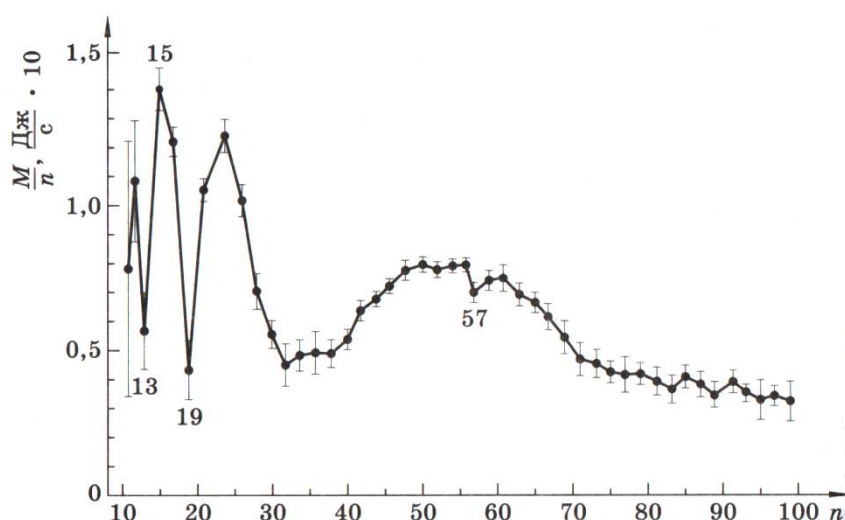


Рис. 3.3. Магнитный момент марганцевых кластеров в расчете на один атом $\frac{M}{n}$ как функция числа атомов n в кластере [4]

Напротив, кластеры неферромагнитных материалов (родия, марганца) неожиданно проявили значительные магнитные моменты.

Теоретики предсказывали, что кластеры марганца должны демонстрировать ферромагнетизм, и эксперимент это подтвердил. Молекулярный пучок, содержащий различные по величине кластеры марганца, получили, воздействуя лазерным лучом на мишень из марганца. Чтобы разделить кластеры с разным магнитным моментом, пучок пропускали через неоднородное магнитное поле - кластеры с разными магнитными моментами образовывали различные пучки. Дальнейшее пропускание пучков через масс-спектрометр позволило определить магнитный момент, соответствующий кластерам, состоящим из определенного числа атомов N (рис. 3.3). При N , равном 13 и 19 (магические числа) обнаружены явные минимумы магнитных моментов.

Первое магическое число 13 определяется тем, что вокруг одной сферы могут «собраться», касаясь ее и друг друга, двенадцать сфер того же радиуса. Второе магическое

число 19 означает, что, когда к кластеру присоединяется еще 6 атомов, его суммарный магнитный момент снова становится минимальным¹. Авторы эксперимента полагают, что кластеры растут как икосаэдры. Заметим, что при увеличении числа атомов наблюдается тенденция стремления магнитного момента к нулю, как это и должно быть для пассивного образца марганца.

Теоретические расчеты японских ученых предсказывают, что *легирование* атомами двухвалентных металлов кластеров кремния, скандия, германия существенно увеличит их стабильность. Стабильными должны стать даже кластеры с «немагнитическим» числом

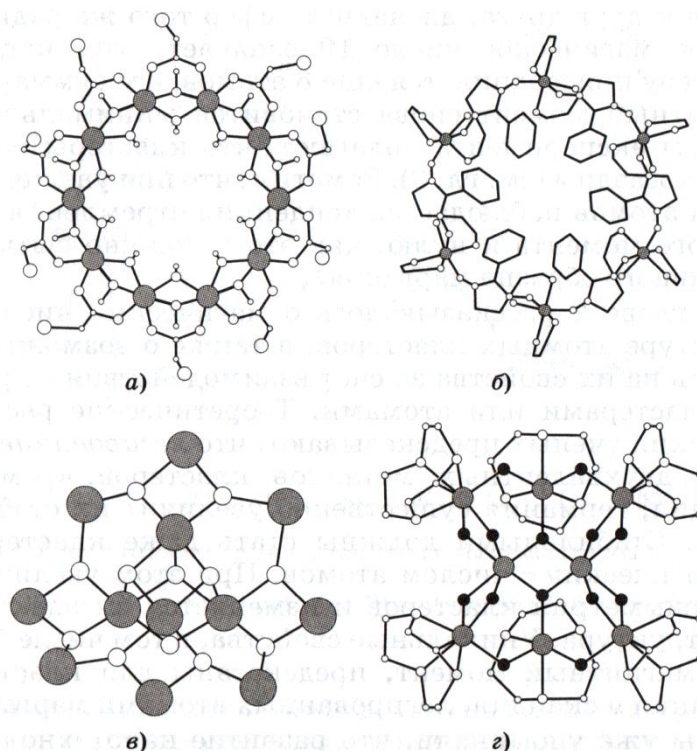


Рис. 3.4. Структуры металлоорганических молекул-магнитов:
a — Fe_{10} ; *b* — Mn_6 ; *c* — Mn_{12} ; *d* — Fe_8 .
Атомы металла выделены черным [5]

атомов. При этом увеличивается симметрия кластеров и изменяется их электронная структура. Уникальные свойства, в том числе большой магнитный момент, предсказаны для кластеров германия и скандия, легированных атомами марганца.

Мы уже упоминали, что развитие нанотехнологии требует активного использования молекулярного дизайна. В лабораторных условиях синтезированы уникальные молекулы-магниты (рис. 3.4) с определенным значением магнитного момента. Это металлоорганические молекулы, в которых ионы переходных элементов (железа, марганца и др.) обрамлены ионами кислорода, хлора, углерода. Фактически молекулы-магниты моделируют в наномасштабе свойства макроскопических твёрдых тел. В «железном колесе» (рис. 3.4, *a*) десять ионов железа Fe^{3+} окружены ионами кислорода, углерода и хлора. Взаимодействие между ионами железа таково, что суммарный момент молекулы равен нулю, т.е. она моделирует антиферромагнетизм (см. рис. 3.2, *b*). В марганцевом кольце (рис. 3.4, *b*), где ио-

¹ магнитные и магические числа, соответствующие минимумам магнитных моментов, могут отличаться от магических чисел, соответствующих наиболее устойчивым кластерам

ны металла марганца Mn^{2+} со спином $5/2$ чередуются с органическими радикалами со спином $1/2$, их разные по величине спины складываются, как в ферромагнетике (см. рис. 3.2, в). Если, например, все спины ионов марганца направлены вверх, а спины радикалов вниз, то в итоге суммарный спин молекулы будет иметь большое значение $S = 12$. Ферромагнетиком оказывается и третий магнитный кластер, изображенный на рисунке 3.4, в, со спином $S = 10$.

Такие молекулы интересуют биологов, так как органические железосодержащие молекулы обнаружены во многих живых организмах. Структура магнитных молекул изображена на рисунке 3.4, близка к структурам живых организмов. Так, важнейшие соединения *гемоглобин* и *миоглобин* содержат комплексное соединение железа (гем), окруженное белками (глобин).

Такие магнитные молекулы фактически являются отдельными магнитными доменами. Если из них сконструировать магнетик, он будет лишен недостатков, связанных с наличием доменных границ. Поэтому магнитные кластеры выгодно использовать, «монтируя» их в какую-либо матрицу, чтобы изолировать друг от друга и сохранить их необычные свойства. Изучение квантовых переходов в магнитных молекулах важно для разработки квантовых компьютеров.

Методы получения магнитных кластеров

Для создания магнитных кластеров используются, кроме химического синтеза, молекулярные пучки, сканирующая туннельная микроскопия. Для создания микроскопического материала, включающего магнитные наночастицы, предлагаются как традиционные способы «сверху вниз» (классическая для микроэлектроники литография), так и новые технологии.

Области применения магнитных кластеров

Кроме научного значения, исследования магнитных нанокластеров представляют большой практический интерес с точки зрения использования необычных свойств наноструктур в современной технике, в частности, для записи и чтения информации со сверхвысокой плотностью, для нужд медицины, улучшения и стабилизации свойств других наноструктур и т. д.

Среди применений наномагнитов в медицине можно упомянуть разрабатываемый метод безоперационного надежного определения метастаз в лимфатических ных - метод **магнитно-резонансной томографии**. Наночастички захватываются макрофагами - иммунными клетками, перемещающимися по лимфатическим узлам, что приводит к изменению магнитных свойств клеток, вызывая на экране затуманенное изображение здорового лимфатического узла. Лимфатические узлы с опухолевыми клетками хуже пропускают поток макрофагов, такие узлы выглядят на экране и снимках ярче.

Берлинские медики используют так называемые гипертермические медикаменты - небольшие, около 10 нм, магнитные частицы, покрытые золотом, которые поглощаются тканью опухоли. Под воздействием магнитного поля наночастицы приходят в движение, разогревая тем самым клетки опухоли, которые в результате погибают.

Малые магнитные частицы предлагается использовать для нанесения на важные финансовые документы штрих - кодов, практически защищенных от любой подделки.

Испанские исследователи разработали сверхлегкий прозрачный магнитный материал, в котором в плотный, но сверхпористый аэрогель из кварца вкраплены магнитные наноча-

стицы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Материал похож на дымчатое стекло и по плотности близок к дереву. Предполагаемые применения: магнитооптический дисплей, управляемый не электрическим, а магнитным полем, устройства памяти и пр.

Естественным применением магнитных наночастиц в духе общего развития нанотехнологии является и введение внутрь каркасных наноструктур - фуллеренов или углеродных нанотрубок. Такие на спигованные нанотрубки в будущем могут быть использованы для хранения информации или как сверхмалые магниты, тем более что нанотрубки защищают атомы металла от окисления. Например, в углеродные нанотрубки диаметром от 20 до 70 нм и длиной около 40 мкм удалось поместить частички железа, которые распределились равномерно, образуя подобие кристаллической структуры. Углеродные нанотрубки заполняют частицами кобальта, никеля, получая при этом отличные магнитные материалы, которые могут долго храниться на воздухе и при повышенной температуре. Нагрев в течение двенадцати часов до 150-200 °С не приводит к окислению кобальта, в то время как незащищенные нанокластеры полностью окисляются.

Суперпарамагнетизм

Применение системы магнитных наночастиц сталкивается с проблемой, характерной для объектов наноразмеров. Выше мы рассматривали роль теплового движения в нарушении упорядоченности элементарных магнетиков при парамагнетизме. Для магнитных наночастиц энергия, соответствующая поддержанию ориентации ее магнитного момента, при комнатных температурах становится сравнимой с энергией теплового движения. Поэтому стабильная магнитная упорядоченность системы наночастиц, отвечающая, например, за запись информации, со временем нарушается. Это явление, называемое **суперпарамагнетизмом**, мешает Дальнейшей миниатюризации устройств электроники.

Можно было бы бороться с суперпарамагнетизмом, понижая температуру. Но, во-первых, это усложнит систему, во-вторых, как оказалось, не решит проблему. При обычных температурах элементарный магнитный момент может поменять ориентацию в среднем за некоторое время τ , которое называется временем релаксации. Это время зависит от температуры по универсальному **закону Аррениуса**, описывающему скорости многих физических и химических процессов:

$$\tau = \tau_0 e^{U_0/k_B T}, \quad (3)$$

где τ_0 - некоторая константа, k_B - постоянная Больцмана, U_0 - потенциальный барьер (рис. 3.5), который разделяет два равновесных состояния.

Впервые явление суперпарамагнетизма обнаружил в 1949 г. при изучении магнетизма земных пород знаменитый французский физик Луи Неель. Он вывел формулу, аналогичную закону Аррениуса. Однако при очень низких температурах обнаруживается отклонение от закона Аррениуса: процесс переориентации идет с постоянной скоростью, не зависящей больше от температуры. Начинает проявляться процесс **квантового туннелирования**, аналогичный тому.

На молекулах-магнитах можно в «чистом» виде изучать процесс суперпарамагнетизма, в том числе при низких температурах. Молекула-магнит Mn-12 (см. рис. 3.4, в) служит

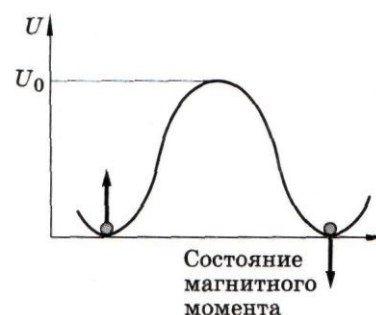


Рис. 3.5. Схема перехода через потенциальный барьер элементарного магнитного момента

объектом многочисленных экспериментов физиков. Во-первых, было доказано, что этот кластер в целом ведет себя как квантовый объект и при низких температурах совершает туннельный переход. Этот результат представляет интерес для физиков. Во-вторых, это дает принципиальную возможность использовать молекулу-магнит для записи информации. Если это удастся, плотность записи информации будет в 10 000 раз выше, чем на современных магнитных дисках, и приблизится возможность создания квантового компьютера.

Один из путей преодоления суперпарамагнетизма уже предложен: использование ферромагнитных наночастиц на антиферромагнитной матрице. Для ферромагнитных наночастиц внутреннее магнитное поле выходит далеко за их пределы, они активно взаимодействуют с матрицей, и матрица стабилизирует их намагниченность, существенно увеличивая температуру проявления суперпарамагнетизма. В одном эксперименте наночастицы ферромагнитного кобальта размерами в несколько нанометров встраивались в антиферромагнитную матрицу оксида кобальта CoO , в которой сохраняли ферромагнитные свойства вплоть до 290 К. Если частицы были встроены в парамагнитную матрицу (например, Al_2O_3), они теряли намагниченность уже при 10 К. Этот эксперимент позволяет надеяться на получение магнитной стабильности элементов памяти размером всего в несколько нанометров (плотность записи информации порядка $0,1 \text{ Тбит/см}^2$).

На особенностях обменного взаимодействия магнитных кластеров основано и другое перспективное направление применения магнитных наноструктур - улучшение условий для сверхпроводимости. Известно, что внешнее магнитное поле разрушает сверхпроводящее состояние. Однако оказалось, что если поверх тонкой сверхпроводящей пленки из свинца расположить кобальтпалладиевые ферромагнитные квантовые точки размером по 800 нм на расстоянии около 1,5 мкм друг от друга, то ток сверхпроводимости усилится. Происходит перераспределение магнитного поля: под каждой точкой возникает магнитное поле, разрушающее состояние сверхпроводимости, но зато этот деструктивный эффект уменьшается между точками. Бельгийские ученые, наблюдавшие в 2003 г. этот эффект, сравнивают его с впитыванием влаги с пола (влага - аналог внешнего магнитного поля) массой маленьких уже слегка влажных губок - пол между губками становится сухим. Предполагается, что изготовленные подобным образом наноточечные матрицы могут быть использованы для логических схем квантовых компьютеров.

Приведенные примеры подтверждают неограниченные возможности влияния на физические и химические свойства кластеров, используя их взаимодействие с другими кластерами, отдельными атомами или матрицей (подложкой).

Магнитные нанослои, гигантское магнитосопротивление

Кроме магнитных кластеров, в технике широко применяются многослойные магнитные структуры - системы чередующихся нанослоев материалов с разными магнитными свойствами (рис. 3.6). Наноструктура на рисунке представляет собой магнитную *сверхрешетку*.

Электрическое сопротивление такой структуры зависит от относительного направления намагниченности магнитных слоев. Изменить направление намагниченности можно магнитным полем. Отношение значений сопротивления при параллельном и антипараллельном направлении намагниченности в соседних слоях называется **ГМС соотношением**. ГМС соотношение зависит от материалов слоев, их количества, температуры и в некоторых случаях составляет несколько десятков процентов. Причина этого эффекта заключается в разной степени рассеяния электронов со спинами, направленными по направлению намагниченности и против.

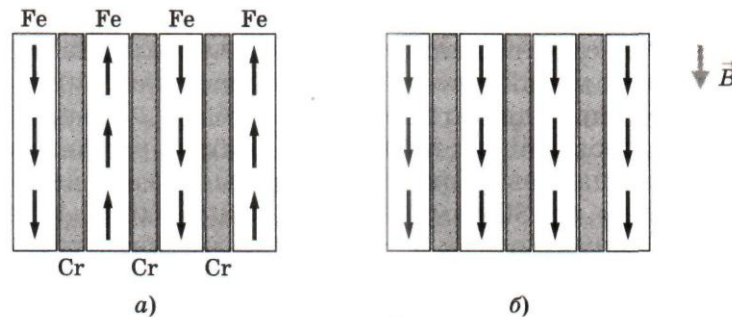


Рис. 3.6. ГМС в нанослоях Fe-Cr:

a — ориентация магнитных моментов атомов железа в нанослоях в отсутствие магнитного поля (структура антиферромагнитна);
б — магнитное поле выше некоторой критической величины делает структуру ферромагнитной

Именно применение эффекта ГМС позволило за несколько последних лет резко увеличить информационную плотность жестких дисков, открыло возможности создания новых видов магнитной оперативной памяти, лучшей, чем полупроводниковые аналоги, во многом определило развитие *спинтроники*.

Спинтроника - раздел электроники, который изучает магнитные наноструктуры и рассматривает в совокупности электрический заряд электрона и его спин.

В 2007 г. А. Ферту и П. Грюнбергу за открытие гигантского магнитосопротивления была присуждена Нобелевская премия по физике с формулировкой «может рассматриваться как первое по настоящему эффективное приложение многообещающей области нанотехнологий».

Информация на современном жестком диске заключена в доменной структуре. Считывающая головка содержит ГМС структуру, в которой один магнитный слой имеет постоянную намагниченность, другой магнитный слой, контактирующий с диском, меняет намагниченность в зависимости от того, какой сигнал записан на домене («единица» или «ноль»). Между магнитными слоями имеется нанослой полупроводника. Изменение силы тока в ГМС структуре в зависимости от намагниченности домена также представляется в двоичном коде («да» или «нет»).

Магнитная память

Требования к увеличению быстродействия электроники включают, в частности, требование увеличения быстродействия в магнитных запоминающих устройствах, где при записи информации происходит изменение намагниченности участка ферромагнетика. Современные материалы со сверхбыстрым «откликом» меняют намагниченность за доли наносекунды.

Магнитные свойства вещества используются для создания различных типов магнитной памяти. Дело в том, что увеличение плотности размещения транзисторов и, соответственно, уменьшение расстояний между ними приводит к появлению токов утечки, к перегреву компьютера. Между тем магнитная память энергонезависима и сохраняется при выключении питания. Компьютер с магнитной памятью процессора будет загружаться практически мгновенно и не потребует сильного охлаждения. В 2006 г. создан рабочий прототип микропроцессора нового типа с такой памятью. Сделаны шаги по созданию с помощью наномангнитов универсального логического элемента, который сможет заменить логические элементы, разработанные на основе транзисторов.

В 2003 г. был предложен новый тип памяти, основанный на нанокольцах кобальта диаметром меньше 100 нм. Кобальтовые наночастицы представляют собой напонамагниченные с южным и северным полюсами, которые самопроизвольно собираются в кольца, причем силовые линии их магнитных полей образуют замкнутую структуру (рис. 3.7). Таким образом, это достаточно замкнутая система, которая может служить элементарной ячейкой памяти. Ориентация общего магнитного поля частичек по или против часовой стрелки позволяет кодировать двоичную информацию. Большим преимуществом таких устройств памяти будет использование ее при комнатной температуре и простота получения. Заметим, что образование такой структуры - типичный пример самоорганизации. Исследователи полагали, что кобальтовые наночастицы образуют просто цепочки, но получили нанокольца.

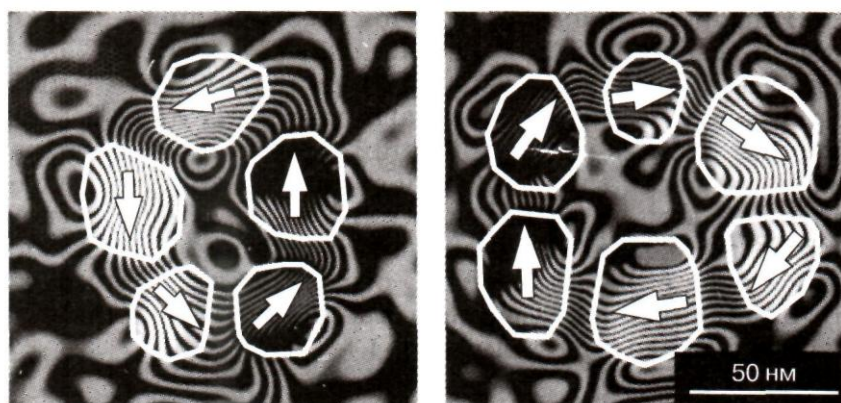


Рис. 3.7. Нанокольца из частичек кобальта [7]

Нанотехнология - междисциплинарная область, граничащая, в частности, с биотехнологией. Неудивительно, что и в области наномангнетизма ученые и технологи обратились к молекулам, присущим биологическим объектам.

В английской компании «Nanomagnetics» проводятся работы по созданию наномангнитов на базе белка апоферритина. Этот белок имеет сферическую форму диаметром 12 нм с внутренней полостью диаметром 8 нм. В полости находится включение, которое в молекулярном дизайне принято называть «гостем». В данном случае «хозяин» (белок) принимает «гостя» - атом железа. Чтобы заменить «гостя», белок сначала обрабатывается раствором кислоты, затем - раствором, который позволяет внедрить в нанополость магнитный кобальт-платиновый сплав. Полученный раствор наносится на жесткий диск и нагревается. Возникающий в итоге процесс самосогласованного структурообразования плот-

но упакованный слой уже позволил разместить около 450 Гбит на см², но планируется за счет такой технологии довести емкость жестких дисков до 5000 Гбит на см².

При экспериментальном исследовании магнитных свойств наномагнитов используются магнитные силовые микроскопы. Весьма актуальным оказывается компьютерный эксперимент: математическое моделирование широко используется при проектировании конкретных новых магнитных элементов памяти.

Вопросы для самопроверки

1. Почему магнитные явления имеют чисто квантовую природу?
2. Какова природа парамагнетизма? Зависит ли намагниченность парамагнитного тела от температуры?
3. Какова природа диамагнетизма? Зависит ли намагниченность диамагнитного тела от температуры?
4. Л. В чем особенность ферромагнитного состояния? Как влияет температура на намагниченность ферромагнетика? Почему для магнитных ячеек памяти важна высокая температура Кюри?
5. Почему магнитные свойства нанокластеров отличаются от магнитных свойств макроскопических образцов этих же металлов?
6. Как можно менять свойства магнитных нанокластеров?

Задания

1. Подготовьте доклад о суперпарамагнетизме и его использовании.
2. Подготовьте конференцию, посвященную применению магнитных кластеров и нанослоев, в том числе в медицине.

Литература

1. Звездин А. К., Звездин К. А. Суперпарамагнетизм сегодня: магниты-карлики на пути в мир квантов // Природа. 2001. № 9. С. 9.
2. Никитин С. А. Гигантское магнитосопротивление // СОЖ. 2004. № 2.
3. Алексеев А. М., Попков А. Ф. Измерения при переменной температуре.
<http://www.yp.internet/kemsu.ru>
4. Иванов И. Магнетизм атомных кластеров. <http://www.scientific.ru/jurnal/news>
5. Звездин А. К. Магнитные молекулы и квантовая механика // Природа. 2000. № 12.
6. Казаков В. Г. Тонкие магнитные пленки // СОЖ. 1997. № 1.
7. <http://www.kompulenta.ru>

Занятие 5.

Лекция: Фуллерены и нанотрубки

Аллотропные соединения углерода

Фуллерены и углеродные нанотрубки представляют собой одну из аллотропных форм углерода в виде своеобразных «каркасных», полых структур (рис. 4.1, 4.2). Их свойства и возможности использования настолько разнообразны и перспективны, что по этой тематике ежегодно публикуется более тысячи научных статей и обзоров.

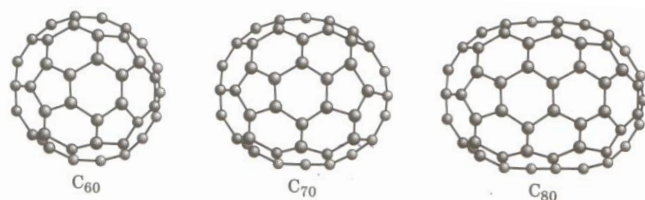
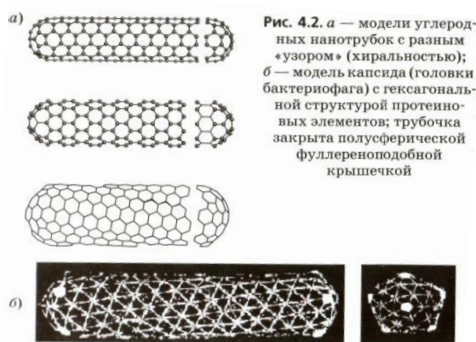


Рис. 4.1. Структура углеродных фуллеренов

Это явление называется **аллотропией** (от греч. *allos* - иной и *tropos* - поворот). Например, железо имеет три кристаллические модификации (α -, β - и γ -железо), а лед - двенадцать (по некоторым данным - четырнадцать). У важнейшего для жизни на Земле элемента углерода до недавнего времени были известны три аллотропные формы. Две из них широко известны, это алмаз и графит. Третья модификация углерода - карбин - открыта в России в 1960 г.

Углерод расположен в IV группе таблицы Менделеева и, соответственно, имеет 4



электрона на внешней оболочке. Известно, что атомы углерода могут находиться в трех основных состояниях, соответствующих разным типам *гибридизации* их валентных *орбиталей*. При sp^3 -гибридизации все четыре *ковалентные связи* атома с соседями равноправны и одинаково ориентированы в пространстве. Так формируется структура алмаза, в которой каждый атом углерода расположен в центре правильного тетраэдра, в вершинах которого находятся четыре ближайших атома (рис. 4.3, а).

Другая аллотропная форма углерода - графит - имеет sp^2 -гибридизацию. Атомы углерода в кристаллической структуре графита также связаны между собой прочными ковалентными связями длиной 0,142 нм и формируют шестиугольные кольца, образующие прочную и стабильную сетку (рис. 4.3, б) Слои располагаются друг над другом на расстоянии 0,335 нм, существенно дальше, чем соседние атомы углерода в слое.

Соответственно слои связаны между собой слабым *ван-дер-ваальсовым притяжением*. Такая структура определяет специфические свойства графита: низкую твердость и способность легко расслаиваться. Поэтому грифель каран-

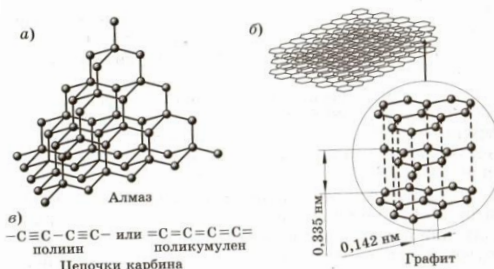


Рис. 4.3. Аллотропные формы углерода: а — алмаз; б — графит; в — карбин [1]

даша оставляет след на поверхности бумаги, и графит используется в качестве смазки.

Структура карбина с *sp*-типом гибридизации изображена на рисунке 4.3, в. Карбин можно получить при облучении лазером пирографита (разновидность графита) в виде белого углеродного осадка на его поверхности. Кристалл карбина состоит из параллельно ориентированных цепочек углеродных атомов с двойными π и язями ($=C=C=C$.) или с чередованием одинарных и тройных связей ($-C\equiv C-C\equiv C-\dots$).

История открытия фуллеренов и их структура

В начале 70-х гг. XX в. японский физико-химик К. Осава высказал предположение о возможности существования четвертой аллотропной формы углерода в виде своеобразной полой супермолекулы C_{60} , состоящей из 60 атомов углерода, и со структурой в виде усеченного икосаэдра, близкой к сферической. В 1973 г. русские ученые Д. А. Бочвар и Е. Г. Гальперин провели квантово-механический расчет стабильности молекулы C_{60} и доказали возможность ее существования.

Из правильных шестиугольников легко выкладывается плоская поверхность, как в случае графита, однако ими не может быть сформирована замкнутая поверхность. Для этого необходимо часть шестиугольников разрезать и из разрезанных частей сформировать пятиугольники.

Открытие фуллеренов произошло случайно. В лаборатории Р. Смолли в техасском Университете Раиса получали и исследовали металлические кластеры. После воздействия лазерного излучения на поверхность металла пучок выбитых частиц анализировался в масс-спектрометре. В августе 1985 г. в лабораторию Смолли приехал известный астрофизик Г. Крото с просьбой исследовать кластеры углерода. Крото предполагал, что спектры некоторых межзвездных скоплений, основу которых составляет углерод, связаны с излучением углеродных кластеров. Во время эксперимента в масс-спектре кластеров углерода обнаружились пики, соответствующие магическим числам 60 и 70, причем кластеры с магическим числом 60 явно доминировали. Единственным возможным объяснением было существование стабильных, совершенных по форме, полой структур углерода из 60 и 70 атомов, которые получили название **фуллерены**. Это предположение было подтверждено дальнейшими исследованиями.

Свое название фуллерены получили в честь поэта, философа и архитектора-авангардиста Бакминстер Фуллера (Buckminster Fuller), запатентовавшего и построившего ряд так называемых геодезических куполов в виде сочлененных пентагонов и гексагонов, в том числе купол павильона США на выставке в Монреале в 1967 г. (рис. 4.4).

В фуллерене C_{60} плоская сетка шестиугольников (графитовая сетка) свернута и сшита в замкнутую сферу с радиусом 0,357 нм. При этом часть шестиугольников преобразуется в пятиугольники (пентагоны). Эта молекула напоминает футбольный мяч, имеющий 12 черных пентагонов и 20 белых гексагонов. Каждый атом углерода в вершине многоугольника имеет трех ближайших соседей и находится одновременно в вершинах двух шестиугольников и одного пятиугольника. Каждый шестиугольник граничит с тремя шестиугольниками и тремя пятиугольниками, а каждый пятиугольник граничит с тремя Б. Фуллера шестиугольниками и тремя на Международ-

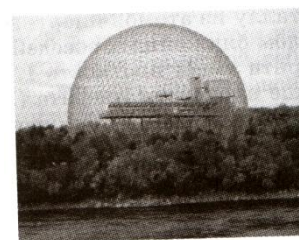


Рис. 4.4. Купол павильона Б. Фуллера на Международной выставке в Монреале (1967)

ной пятиугольниками, а каждый пятиугольник граничит только с шестиугольниками. В отличие от фуллерена C_{60} , моделью которого служит футбольный мяч, фуллерен C_{70} слегка сплюснут и похож на мяч для регби (см. рис. 4.1), его иногда называют «регбиболл».

Из чисто геометрических соображений наименьшим возможным фуллереном является правильный додекаэдр C_{20} . Получены многооболочечные фуллерены (углеродные «луковицы»), состоящие из нескольких положенных друг в друга структур.

Молекулы высших фуллеренов C_{70} , C_{74} , C_{76} , C_{84} , C_{164} , C_{192} , C_{216} вплоть до гигантов C_{1840} имеют также замкнутую (но более «угловатую») форму и существенно различные свойства. Фуллерен C_{28} имеет ту же валентность, что и атом углерода, и образует устойчивый кристалл со структурой алмаза - гипералмаз.

В 1996 г. Г. Крото, Р. Смолли и Р. Керл получили Нобелевскую премию по химии за открытие и изучение фуллеренов.

Соединения фуллеренов и их свойства

Фуллерены могут образовывать молекулярный кристалл, фуллерит, в котором между отдельными фуллеренами существует слабое ван-дер-ваальсово взаимодействие. Поэтому фуллерит аналогичен кристаллу из атомов инертных газов (аргона, неона), с числом ближайших соседей, равным 12. Кристалл фуллерита имеет плотность $1,7 \text{ г/см}^3$, что значительно меньше плотности графита ($2,3 \text{ г/см}^3$) и алмаза ($3,5 \text{ г/см}^3$). Синтезированы *допированные* кристаллы фуллеренов - фуллериды.

Фуллерен C_{60} сохраняет стабильность в инертной атмосфере аргона вплоть до температур порядка 1700 К. В присутствии кислорода уже при 500 К наблюдается значительное окисление с образованием оксидов CO и CO₂. В этих условиях кристаллическая решетка фуллерита разрушается. При комнатной температуре окисление происходит при облучении фотонами инфракрасной области спектра. Поэтому чистый фуллерит необходимо хранить в темноте.

Кристаллические фуллерены и пленки представляют собой полупроводники с шириной запрещенной зоны 1,2-1,9 эВ и обладают *фотопроводимостью*.

Недавно получены пленки полифуллерена, в которых молекулы C_{60} связаны между собой не ван-дер-ваальсовым взаимодействием, как в кристалле фуллерита, а химическим. Эти пленки, обладающие пластическими свойствами, являются новым типом полимерного материала.

Фуллерены способны образовывать широкий класс химических соединений, обладающих различной структурой и физико-химическими свойствами. В последние годы появился даже термин «химия фуллеренов», определяющий новое направление в органической химии. Молекулы фуллеренов, в которых между атомами углерода существуют как одинарные, так и двойные связи, являются трехмерными аналогами ароматических структур. Обладая высокой *электроотрицательностью*, они проявляют себя в химических реакциях как сильные окислители.

Уже в первой публикации исследователи, открывшие фуллерены, предполагали возможность помещать внутрь этих полых молекул разные атомы («гостей»). Почти сразу после открытия фуллеренов Смолли и Крото получили соединение, которое обозначается $La@C_{60}$: атом лантана внутри фуллерена C_{60} . Этот опыт подтвердил, что C_{60} - полая структура. В настоящее время известно, что более трети элементов периодической таблицы Менделеева могут стать «гостем» фуллеренов. Имеются сообщения о внедрении атомов

лантана, никеля, натрия, калия, рубидия, цезия, атомов редкоземельных элементов (тербия, гадолиния и диспрозия). Наномолекулы с внедренными атомами получили название **эндоэдральных**.

Методы получения фуллеренов

Оказалось, что вместо сложного способа получения фуллеренов с использованием мощного лазера (как это было в первых работах Крото и Смолли), их можно получать, причем в большом количестве, испаряя графит в электрической дуге в атмосфере гелия. Дуговой метод получения фуллеренов получил название «фуллереновая дуга».

Гелий играет роль «буферного» газа. Атомы гелия эффективно «гасят» колебательные движения возбужденных углеродных фрагментов (забирают часть кинетической энергии), мешающее объединению отдельных фрагментов в устойчивые фуллереновые структуры. Кроме того, атомы гелия уносят энергию, выделяющуюся после такого объединения. Этот достаточно простой метод получения фуллеренов (и нанотрубок) позволил заняться их исследованием во многих лабораториях мира и послужил основой промышленного их получения.

Углеродные нанотрубки - история открытия, структура

Углеродные нанотрубки были впервые синтезированы в 1991 г. С. Иджима. Исследуя под электронным микроскопом осадок, образовавшийся при распылении графита в электрической дуге не на стенках камеры, как другие исследователи, а на катоде, он обнаружил однослойные и многослойные трубочки длиной в несколько микрон и диаметром в несколько нанометров. Каждый слой трубки представлял собой свернутую сетку графита, и расстояние между этими сетками-слоями оставалось практически такое же, как между слоями графита. Обычно углеродные нанотрубки закрыты на концах «шапочками». В однослойных нанотрубках эти шапочки напоминают половинки фуллерена и состоят из шести пентагональных колец, в многослойных - имеют сложную структуру.

Если фуллерен представляет собой многоатомную молекулу углерода, то углеродные нанотрубки рассматриваются как нанообъекты, в которых сочетаются свойства молекул и макроскопического твердого тела.

Теоретически идеальную нанотрубку можно получить, сворачивая плоскую гексагональную сетку графита под разными углами. Угол определяет важную структурную характеристику нанотрубки, которая называется **хиральностью**. От хиральности зависит диаметр трубки, так как в результате свертывания не должна искажаться структура гексагональной сетки. От хиральности зависят и свойства нанотрубки, прежде всего характер ее проводимости. При определенной хиральности нанотрубки обладают металлическим типом проводимости, при других являются полупроводниками. На рисунке 4.5 приведен пример схемы получения нанотрубки определенной хиральности. Точки

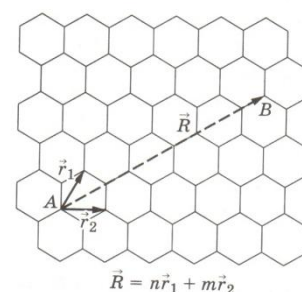


Рис. 4.5. Схема «сворачивания» графитового листа в углеродную нанотрубку

А и В - начало и конец вектора \vec{R} , равного:

$$\vec{R} = n\vec{r}_1 + m\vec{r}_2,$$

где n и m - целые числа. Чтобы получить нанотрубку, надо свернуть графитовый лист, соединив точки А и В. В зависимости от значения n и m получают трубки разного диамет-

ра и различной хиральности: при $n = m$ - кресельные трубки, при $m = 0$ - зигзажные. При других значениях n и m получаются трубки произвольной хиральности. В изображенном на рисунке 4.5 случае $n = m = 3$.

Многослойные нанотрубки могут быть похожи на свиток либо образовывать так называемую «русскую матрешку» - вложенные друг в друга однослойные нанотрубки. С увеличением числа слоев начинают проявляться различные дефекты структуры, образуются изогнутые и спиралевидные нанотрубки, которые складываются в сложные протяженные структуры. Получены разветвленные углеродные нанотрубки, что представляет интерес для нанoeлектроники.

Самые маленькие на сегодняшний день нанотрубки имеют диаметр 0,4 нм - теоретически такой размер является пределом. Однако с помощью электронного микроскопа высокого разрешения была обнаружена нанотрубка диаметром всего 0,28 нм. Она является метастабильной и, видимо, поэтому существует только внутри другой многослойной трубки. Кроме того, получены углеродные нанонити. На рисунке 4 цветной вклейки приведен итог компьютерного моделирования многостенной углеродной трубки с углеродной нанонитью внутри.

Исследование свойств нанотрубок затрудняется тем, что обычно в эксперименте получают набор различных углеродных структур. Только в 1996 г. удалось начать экспериментальные измерения свойств отдельных нанотрубок.

Использование фуллеренов и углеродных нанотрубок

Перспективы использования фуллеренов и углеродных нанотрубок, основанные на их удивительной структуре и соответствующих свойствах, разнообразны и все время расширяются.

Прозрачность растворов фуллеренов в неполярных растворителях (сероуглерод, толуол, бензол, тетрахлорметан, декан, гексан, пентан) при определенных условиях резко снижается. Это открывает возможность использования фуллеренов в качестве основы оптических затворов - ограничителей интенсивности лазерного излучения, защиты глаз или чувствительных датчиков от облучения.

Фуллерены перспективны в качестве основы для создания запоминающей среды со сверхвысокой плотностью информации; в качестве присадок, улучшающих свойства, для ракетного топлива, смазочного материала; для создания катализаторов роста, алмазных и алмазоподобных пленок, сверхпроводящих материалов, в качестве красителей для копировальных машин. Они применяются для получения металлов и сплавов с новыми свойствами.

Фуллерены планируют использовать в качестве основы для производства сверхконденсаторов - устройств, в которых может за короткое время выделяться большое количество энергии, что важно, например, для транспортных средств. Принцип их действия основан на реакции присоединения водорода, но, в отличие от широко распространенных литиевых аккумуляторов, они благодаря большой площади поверхности способны запасть примерно в пять раз больше водорода. По сравнению с аккумуляторами на основе лития такие батареи характеризуются более высокой эффективностью, малым весом, а также экологической и санитарной безопасностью. Они должны найти применение для питания персональных компьютеров и слуховых аппаратов.

Перспективно использование фуллеренов в медицине и фармакологии. Разрабатыва-

ется метод создания противораковых медицинских препаратов на основе водорастворимых эндодральных соединений фуллеренов с радиоактивными изотопами. Найденны условия синтеза противовирусных и противораковых препаратов на основе фуллеренов. Одна из трудностей при решении этих задач - создание водорастворимых нетоксичных соединений фуллеренов, которые могли бы вводиться в организм человека и доставляться кровью в орган, подлежащий терапевтическому воздействию.

Исследователи буквально «играют» с нанотрубками и их разнообразными возможностями. Если заставить углеродную нанотрубку колебаться в электрическом поле, можно ее использовать как точные весы для измерения массы предельно малых объектов, типа вирусов. Взвешиваемая частица располагается на конце нанотрубки, при этом собственная частота колебаний трубки уменьшается. По изменению частоты можно судить о массе частицы. Например, в одном эксперименте резонансная частота упала с 3,28 МГц до 968 кГц, что соответствует массе частицы $22 \text{ фг} = 22 \cdot 10^{-15} \text{ г}$.

Нанотрубки проводят тепло лучше, чем алмаз, который раньше считался самым эффективным проводником тепла. Их используют как «теплосмазку» для отвода тепла от компьютеров.

В ближайшие 10 лет могут появиться автомобильные шины, усеянные углеродными нанотрубками и позволяющие остановить машину, ехавшую со скоростью 80 км/ч, на тормозном пути всего в 5 м. Изобретатели смоделировали природное приспособление на лапках ящерицы геккона: в зависимости от угла соприкосновения нановолосков на его лапках с поверхностью связь лапок с поверхностью или очень сильная, или практически исчезает, поэтому геккон может быстро ползать даже по потолку.

Электрические свойства нанотрубок

Углеродные нанотрубки заинтересовали физиков прежде всего своими необычными электрическими свойствами и возможностью их использования в наноэлектронике, в устройствах совершенно нового типа с улучшенными характеристиками.

Одним из первых применений было использование нанотрубок, благодаря их высокой жесткости и нанометровому радиусу закругления на конце, в качестве зондов для сканирующей зондовой микроскопии. Первые эксперименты в этом направлении оказались весьма успешными. Кроме того, если к концу такого зонда «привить» определенные химические функциональные группы, как это делают в биосенсорах, то открывается возможность создания противораковых медицинских препаратов на основе водорастворимых эндодральных соединений фуллеренов с радиоактивными изотопами. Уже найдены условия синтеза противовирусных и противораковых препаратов на основе таких фуллеренов. Одна из трудностей при решении этих задач - создание водорастворимых нетоксичных соединений фуллеренов, которые могли бы вводиться в организм человека и доставляться кровью в орган, подлежащий терапевтическому воздействию.

Исследователи буквально «играют» с нанотрубками и их разнообразными возможностями. Если заставить углеродную нанотрубку колебаться в электрическом поле, можно ее использовать как точные весы для измерения массы предельно малых объектов, типа вирусов. Взвешиваемая частица располагается на конце нанотрубки, при этом собственная частота колебаний трубки уменьшается. По изменению частоты можно судить о массе частицы. Например, в одном эксперименте резонансная частота упала с 3,28 МГц до 968 кГц, что соответствует массе частицы $22 \text{ фг} = 22 \cdot 10^{-15} \text{ г}$.

Нанотрубки проводят тепло лучше, чем алмаз, который раньше считался самым эффективным проводником тепла. Их используют как «тепლოსмазку» для отвода тепла от компьютеров.

В ближайшие 10 лет могут появиться автомобильные шины, усеянные углеродными нанотрубками и позволяющие остановить машину, ехавшую со скоростью 80 км/ч, на тормозном пути всего в 5 м. Изобретатели смоделировали природное приспособление на лапках ящерицы геккона: в зависимости от угла соприкосновения нановолосков на его лапках с поверхностью связь лапок с поверхностью или очень сильная, или практически исчезает, поэтому геккон может быстро ползать даже по потолку.

Электрические свойства нанотрубок

Углеродные нанотрубки заинтересовали физиков прежде всего своими необычными электрическими свойствами и возможностью их использования в наноэлектронике, в устройствах совершенно нового типа с улучшенными характеристиками.

Одним из первых применений было использование нанотрубок, благодаря их высокой жесткости и нанометровому радиусу закругления на конце, в качестве зондов для сканирующей зондовой микроскопии. Первые эксперименты в этом направлении оказались весьма успешными. Кроме того, если к концу такого зонда «привить» определенные химические функциональные группы, как это делают в биосенсорах, это позволит при сканировании распознавать химические и биологические объекты.

Ширина запрещенной зоны и соответственно электрические свойства нанотрубок зависят от их хиральности, т. е. от относительной ориентации оси трубки и составляющих ее гексагонов. Электрическое сопротивление некоторых нанотрубок меньше, чем даже у меди. Поэтому предлагается использовать их как нанопровода в интегральных схемах. Отдельными углеродными нанотрубками можно манипулировать с помощью метода АСМ, что перспективно для формирования наноэлектронных цепей.

Нанотрубки с другой структурой являются полупроводниками и могут использоваться в схемах в роли полупроводниковых приборов.

Особенностью современных полупроводниковых приборов является использование гетероперехода - перехода от металла к полупроводнику или от одного полупроводника к другому.

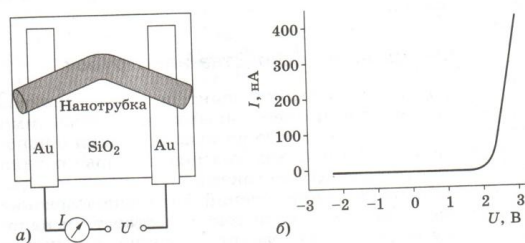


Рис. 4.6. а — схема нанодиода на углеродной нанотрубке с дефектом структуры на изгибе, благодаря которому по одну сторону изгиба трубка ведет себя как проводник, по другую — как полупроводник; б — вольт-амперная характеристика нанодиода [2]

Для получения такого перехода надо отдельно вырастить каждую из двух составляющих и затем их очень точно соединить, «сварить». В углеродной нанотрубке такой переход просто получается, если создать в ней дефект структуры (например, два гексагона превратить в Пентагон и семиугольник при изгибе нанотрубки). Возникает нанодиод (рис. 4.6).

Всего один электрон может изменить проводимость нанотрубки от состояния проводника к диэлектрику и наоборот. И мы получаем *транзистор* на одном управляющем электро- троне.

Электропроводность нанотрубок, кроме того, зависит от величины приложенной механической нагрузки. Это свойство лежит в основе создания нанодатчиков давления.

Многослойные нанотрубки под действием электрического напряжения активно ис-

пускают электроны, что позволяет применить их как низкотемпературные катоды, или *эмиттеры*. Горячие эмиттеры современных электронно-лучевых трубок требуют опасных напряжений 20-30 кВ. Нанотрубки при комнатной температуре и напряжении всего 500 В создают ток такой же плотности, как стандартный вольфрамовый катод при 1000 °С. К тому же они не содержат экологически вредных металлов. Холодные эмиттеры на нанотрубках - основной элемент плоских телевизоров будущего, портативных источников СВЧ-, рентгеновского излучения и пр. Их разработкой занимаются многие известные фирмы, они находятся уже в полупромышленной стадии. На рисунке 5 цветной вклейки приведена фотография плоского дисплея на нанотрубках фирмы «Samsung». Зерно изображения на таких дисплеях очень мало - порядка 1 мкм.

Подавая на углеродную нанотрубку низкое напряжение, можно заставить ее светиться в инфракрасной области с технически важной длиной волны $\lambda = 1,5$ мкм. Именно волны с этой длиной волны используются в телекоммуникационной технике. Варьируя диаметр трубки, можно менять значение длины волны излучения.

Появились сообщения, что некоторые металлофуллерены являются *высокотемпературными сверхпроводниками*.

Механические свойства углеродных нанотрубок

Материаловеды возлагают большие надежды на исключительно высокую прочность и жесткость нанотрубок, сочетающуюся с их повышенной упругостью. Высокая прочность ковалентной связи С-С (вспомним алмаз) и отсутствие дефектов структуры делает углеродные нанотрубки уникальным конструкционным материалом. Нанотрубки проявляют высокую жесткость на изгиб и вместе с тем большую гибкость. После сгибания на 90° они могут полностью восстанавливать свою форму. Их прочность в 60-100 раз выше, чем прочность хорошей стали, при этом они, в силу своей «ажурности», почти в 6 раз легче. Поэтому именно материал из углеродных нанотрубок рассматривается как основа троса *космического лифта* (рис. 4.7). Действительно, если взять не кабель, а нить из одиночной углеродной трубки, соединяющую Землю и Луну, то моток этой нити был бы с зернышко мака. Такие тросы из углеродных нанотрубок предлагают использовать в будущем для уникального моста через Гибралтарский пролив, соединяющего Испанию с Марокко.

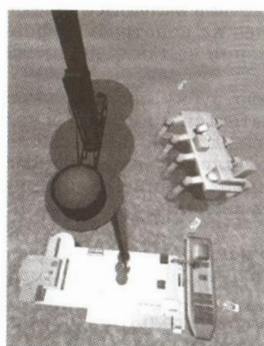


Рис. 4.7.
Космический лифт [35*]

Углеродные нанотрубки можно применять как наполнитель в *композиционном материале*.

Очень важен переход от нанотрубок к макроскопическому материалу. Китайские учёные изготовили пряжу из сверхдлинных (до 30 см) пучков углеродных нанотрубок. Авторы пряжи считают, что из соответствующей ткани можно будет делать бронежилеты или использовать её для защиты от электромагнитного излучения. Придумана технология получения прозрачной ткани из нанотрубок, которая может стать, в частности, основой гибкого и очень прочного дисплея.

Углеродные наноконтейнеры

Выше отмечалось, что полая структура фуллеренов и нанотрубок породила идею использовать их как наноконтейнеры для различных материалов, в том числе биологических или радиоактивных. Заполненные углеродные наночастицы можно применять в биологи-

ческих сенсорах, в ядерной медицине. Важно уметь «по сигналу» открывать и закрывать крышечки на трубках. Углеродные нанотрубки, заполненные металлом, защищают его от окисления и играют роль отдельных наноманитов, если металл - ферромагнетик. Они могут также защищать от окисления фуллерены, такие структуры называют «горошинами в стручке» (рис. 4.8). Более того, научились получать «горошины», которые сами содержат внутри металл. Заполненные металлом нанотрубки могут служить нанопроводами для электроники. Многослойную нанотрубку, заполненную металлическим галлием и открытую с одного конца, можно использовать как нанотермометр в труднодоступных местах.

Возможность использования углеродных нанотрубок как контейнеров послужила основанием для патента (Япония, 1998 г.) на способ хранения водорода - энергетически выгодно, но взрывоопасного топлива. Для его хранения не нужны огромные тяжелые баллоны, так как храниться он будет под давлением в нанотрубках, покрытых палладием или платиной. При необходимости водород можно извлекать за счет подогрева. На 500 км пробега автомобиля потребуется всего около 3 кг водорода.

Использование фуллеренов и нанотрубок в наноэлектромеханических системах (НЭМС)

Нанотрубки и фуллерены рассматриваются в нанотехнологии как элементы конструкции различных наномеханизмов и нанороботов. На основе многослойной нанотрубки был создан первый электромеханический наномотор. Нанотрубка служила одновременно осью ротора и электропроводником к нему.

Однако более близкая перспектива использования углеродных нанотрубок в наноэлектромеханических системах (НЭМС) связана с зависимостью их электрических свойств от приложенного механического напряжения. Это позволит создать наносистемы, преобразующие механический сигнал в электрический и обратно.

Углеродные наноструктуры в природе и в изделиях ремесленников

Различные каркасные углеродные наноструктуры встречаются и в природе. В 1992 г. в природном углеродном материале шунгите (от названия поселка в Карелии - Шуньга) были обнаружены природные углеродные нанотрубки, в 1993 г. в шунгитах были найдены фуллерены и другие микрочастицы углерода - C_{70} , нанотрубки, матрешки, луковицы.

Некоторые наноструктуры получали много веков назад умелые ремесленники, эмпирически добивавшиеся высокого качества своих изделий. Естественно, что эти наноструктуры они наблюдать не могли, им был важен практический результат. В 2006 г. немецкие кристаллографы, пытавшиеся разгадать утраченный рецепт изготовления дамасских клинков, обнаружили в их лезвии углеродные нанотрубки и нановолокна из цементита (карбида железа). Они предполагают, что эти структуры образовывались в сложном процессе обжига иковки. Хороший дамасский клинок должен был рассекал падающий на него лоскуток шелка.

Заметим, что структуры, аналогичные нанотрубкам, встречаются среди вирусов [1, 5].

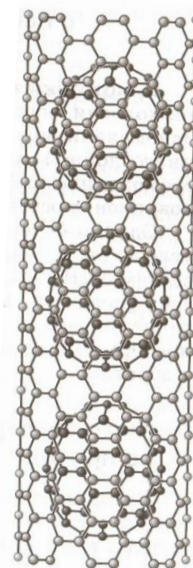


Рис. 4.8. «Горошины в стручке» — фуллерены в углеродной нанотрубке

Перспективы применения фуллеренов и нанотрубок

Коммерческое применение фуллеренов пока сдерживается их высокой стоимостью, которая складывается из трудоемкости получения фуллереновой смеси и трудности выделения из нее отдельных компонентов с одинаковой структурой и свойствами. Скорее всего, в первую очередь будут развиваться те направления, в которых можно использовать массивы нанотрубок (композиционные материалы, сенсоры, защитные покрытия и пр.).

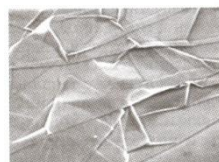
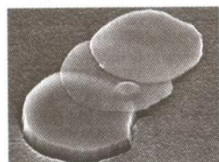


Рис. 4.9. Графеновая пленка и структура графена [9]

По данным на апрель 2007 г., в мире выпускаются уже четыре косметических крема, содержащих фуллерены (японская, английская, американская фирмы). Публиковались отдельные данные о токсичности нанотрубок и фуллеренов, что заставило осторожно относиться к ним как к контейнерам для лекарств. Однако выяснилась недостоверность этих данных, связанная с недостаточной чистотой эксперимента. Другие эксперименты показали, что сам фуллерен не только не токсичен, но в ряде случаев проявляет в организме защитные свойства в качестве антиоксиданта.

Кроме углеродных, созданы и исследуются фуллереноподобные наночастицы и нанотрубки нитрида бора (рис. 6 на цветной вклейке), карбида кремния, карбида бора и других соединений, содержащих бор, молибден, ниобий, азот, углерод, и обладающие своеобразными свойствами и перспективами использования. Нитрид бора, подобно углероду, имеет гексагональную электронную структуру, похожую на графит. Так как в природе существует огромное количество слоистых неорганических кристаллов, можно предсказать синтез разнообразных фуллереноподобных наноструктур и нанотрубок.

Как всегда в науке, сработал «спусковой механизм», вызванный в данном случае открытием углеродных каркасных структур. Недавно появилось сообщение о получении нового наноматериала - **графена** (рис. 4.9). Он имеет структуру, аналогичную графиту, в виде пленок атомарной толщины. Получившие его английские и российские ученые сравни-



Рис. 4.10. Процентное распределение патентов и патентных заявок в области углеродных нанотрубок по различным областям изобретений
[www//spiegel.de, grendel.ph.man.ac.ru]

вают графен с «развернутой» углеродной нанотрубкой или единственным слоем графита. Высокая проводимость и особенности структуры графена делают его соперником крем

С каждым днём появляются новые публикации о возможностях применения удивительных каркасных наноструктур. Из экзотических объектов фуллерены и нанотрубки быстро превращаются в коммерческие продукты,

что подтверждается резким ростом патентов в этой области. Об интересах промышленно-

сти в разных областях применения углеродных нанотрубок можно судить по диаграмме (рис. 4.10).

Вопросы для самопроверки

1. Что такое аллотропные соединения? Приведите примеры.
2. Чем отличается структура алмаза от структуры графита, графита от углеродной нанотрубки?
3. Почему фуллерены и нанотрубки называют «каркасными» структурами? Как эта их особенность сказывается на механических свойствах?
4. Какой тип проводимости (металл, диэлектрик, полупроводник) характерен для углеродных нанотрубок?
5. . Какие области применения фуллеренов и нанотрубок вы знаете?
6. Встречаются ли «каркасные» углеродные структуры в природе?
7. Какие из химических элементов, кроме углерода, могут образовывать нанотрубки?
8. Какие из существующих способов получения фуллеренов и углеродных нанотрубок вы знаете?

Задания

1. Нарисуйте на листе бумаги (кальке) шестиугольную сетку графита. Края бумаги вырежьте, чтобы остались целыми последние шестиугольные кольца. Попробуйте в соответствии с рисунком 4.5 получить несколько вариантов «углеродной трубки» с разным «узором» и разным диаметром, по-разному сворачивая лист. При этом шестиугольные кольца должны совмещаться.
2. Оформите стенд, посвященный идее космического лифта, используя материалы интернет-сайтов.
3. Подготовьте групповой проект о применении углеродных трубок в технике и медицине.

Литература

1. Хайманн Р. В., Евсюков С. Е. Аллотропия углерода//Природа. 2003. № 8.
2. Дьячков П. Н. Углеродные нанотрубки. Материалы для • компьютеров XXI века//Природа. 2000. № 11.
3. Золотухин И. В. Углеродные нанотрубки//СОЖ. 1999. №3.
4. Мастеров В. Ф. Физические свойства фуллеренов//СОЖ. 1997. №1.
5. Сидоров Л.Н., Макеев Ю.А. Химия фуллеренов//СОЖ. 2000. № 5.
6. Елецкий А. В. Перспективы применения углеродных нанотрубок//Российские нанотехнологии. Т. 2. 2007. № 5-6.

Занятие 6.

Лекция: Фотонные кристаллы - оптические сверхрешетки

Сверхрешетки

В современной физике и технике успешно используются сверхрешетки. **Сверхрешетки** (crystal super-lattice) - это твердые тела с периодическим чередованием областей, в которых какая-либо физическая величина, характеризующая свойства тела (магнитные, электрические, упругие и т. д.), имеет разные значения.

При этом размеры таких областей и расстояния между ними на несколько порядков больше межатомных расстояний. Еще в 1962 г. академик Л. В. Келдыш рассмотрел теоретически сверхрешетку и особенности ее зонной структуры.

Периодическая по одной оси, слоистая структура называется одномерной сверхрешеткой (1D - от англ. *dimension* - размерность). Так, слоистая структура на рисунке 3.6 представляет собой 1D-магнитную сверхрешетку: чередующиеся слои отличаются магнитными свойствами. Пример двумерной (2D) полупроводниковой сверхрешетки - это система квантовых ям, разделенных барьерными слоями с туннельным типом проводимости на поверхности полупроводника. В этих поверхностных структурах периодически, по двум направлениям, изменяются электрические свойства. В трехмерной (3D) сверхрешетке по трем направлениям периодически повторяются одинаковые по размеру области с различными физическими свойствами.

Дифракция на одно-, двух-, трехмерной сверхрешетке.

Зонная теория фотонных кристаллов

В 1980-х гг. появился термин фотонный кристалл (photonic crystal). Фотонные кристаллы - оптические сверхрешетки. В них периодически изменяется коэффициент преломления.

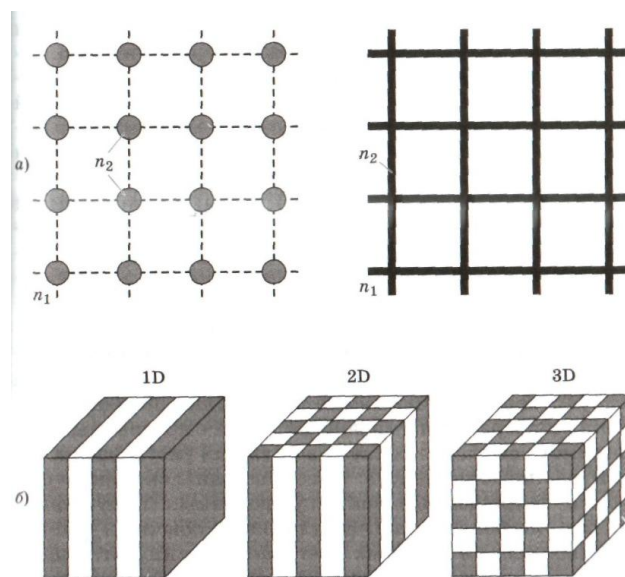


Рис. 5.1. а — модели фотонных кристаллов [2];
б — фотонные кристаллы разной размерности [3]

В школьном курсе физики (11 класс) рассматривается *дифракционная решетка* и условия *дифракции* света на ней. Такая решетка состоит из чередующихся непрозрачных и прозрачных областей. Явление дифракции наблюдается на периодической решетке, если

длина волны падающего электромагнитного излучения λ соизмерима с периодом решетки. Например, в обычном кристалле явление дифракции наблюдается для рентгеновских лучей, длина волны которых порядка расстояний между атомами, но не наблюдается в видимом диапазоне электромагнитных колебаний.

Эффект дифракции можно также получить за счет периодического чередования областей с разным коэффициентом преломления n (рис. 5.1,а). В этом случае появляются дополнительные возможности управления условиями интерференции за счет изменения величины n .

Таким образом, на базе твердого тела, кристаллического или аморфного, можно искусственно создать дифракционную решетку с периодом, сравнимым с длиной волны в видимом диапазоне или инфракрасной области. Для этого в твердом теле нужно получить периодически повторяющиеся области с разным коэффициентом преломления - оптическую сверх решетку или фотонный кристалл (рис. 5.1).

Расстояния между объектами, образующими фотонный кристалл, и размер самих объектов на несколько порядков превышают расстояния между атомами основной среды (для оптического диапазона в 1000 раз, т. е. на три порядка). Фотонные решетки, как все наноструктуры, заполняют область между атомными кристаллическими решетками и макроскопическими искусственными периодическими структурами.

Периодическое изменение коэффициента преломления может быть создано в одном, двух или трех измерениях. Соответственно, получим так называемые 1D-, 2D-, 3D-фотонные кристаллы (рис. 5.1,б). Фактически это и есть одномерные, двумерные и трехмерные дифракционные решетки.

Дифракционная решетка, изображенная на страницах школьного учебника, соответствует одномерному фотонному кристаллу (1D-структуре). 1D-структурой является и конструкция из тонких параллельных слоев двух материалов (см. рис. 5.1, б), при этом толщина слоев должна быть одного порядка с длиной волны интересующего нас электромагнитного излучения, а площадь может иметь вполне макроскопические размеры.

Условия максимума интерференции для двумерной дифракционной решетки (структуры) по сравнению с одномерной, естественно, усложняются. Вместо чередования светлых и темных линий на экране, параллельном плоскости решетки, получается система светлых точек преломления).

Самый интересный случай - трехмерная дифракционная решетка (3D-структура). Условия максимума скрученности интерференции настолько усложняются, что для данной длины волны они могут не выполняться ни для такой решетки волны с некоторыми длинами волн распространяться вообще не могут. Так появляется представление о **фотонной запрещенной зоне**. Возникает ситуация, аналогичная существованию запрещенной энергетической зоны для электронов в зонной теории твердых тел. Понятие запрещенной зоны для электромагнитных волн (photonic band gap) ввел в 1987 г. Э. Яблонович.

Физическая природа возникновения запрещенных зон для электронов и фотонов одна и та же - это условия распространения волн в среде с периодически изменяющимися свойствами. *Волновая природа электрона* ставит его «на одну доску» с электромагнитным излучением.

По аналогии с классической зонной теорией фотонные кристаллы делят на проводники, диэлектрики и полупроводники. Фотонные проводники обладают широкими разре-

шенными зонами, в этих прозрачных для видимого света телах свет на больших расстояниях почти не поглощается. У фотонных диэлектриков широкие запрещенные зоны, у фотонных полупроводников они более узкие. В отличие от обычных непрозрачных сред, в которых световая энергия поглощается и переходит в тепловую, фотонные диэлектрики не поглощают свет, - он в них просто не распространяется.

В запрещенной зоне фотонных кристаллов можно создавать энергетические уровни, аналогичные *донорным и акцепторным уровням* для классических полупроводников. Такой примесной проводимости соответствуют, например, пустоты на месте некоторых элементов фотонного кристалла, их объединение в нитевидные полости или отдельные включения вещества с другим значением показателя преломления (локальное изменение коэффициента преломления). Нитевидные полости являются идеальными проводниками света при любой их форме и извилистости. Свет идет по ним, как ток по проводу любой скрученности.

Оптоэлектроника. Возможности оптического компьютера

В современной *оптоэлектронике* электронные и фотонные разрешенные и запрещенные зоны приходится рассматривать в совокупности: например, электрон и дырка не могут *рекомбинировать* с выделением фотона, если энергия их рекомбинации (энергия испускаемого фотона) попадает в запрещенную фотонную зону. В этом случае время жизни возбужденного атома может быть увеличено во много раз.

Исторически теория дифракции на трехмерных решетках начала интенсивно развиваться с 1912 г., когда в качестве трехмерной решетки был взят кристалл и использовано излучение с длиной волны в диапазоне 0,01-1 нм, что соответствует рентгеновскому Дипазону шкалы электромагнитных излучений. В 1915 г. отец и сын Брэгги (Генри и Лоуренс Брэгги) получили Нобелевскую премию за развитие метода рентгеноструктурного анализа кристаллов. Заметим, что именно в лаборатории Брэгга были впоследствии расшифрованы структуры гемоглобина и миоглобина и структура ДНК (Нобелевские премии 1962 г.: М. Перутц - Д. Кендрю и Д. Уотсон - Ф. Крик).

Теперь, спустя почти 100 лет, оптоэлектроника, изучая и создавая искусственные фотонные кристаллы, в свою очередь использует результаты и достижения рентгеноструктурного анализа. Одновременно оптоэлектроника эксплуатирует представления классической зонной теории для электронов.

В последние 10-15 лет число научных работ и проектов по фотонным кристаллам резко увеличилось» в основном из-за больших технических возможностей этих структур. Повышенный интерес к фотонным кристаллам и устройствам на их основе проявляют ведущие предприятия высоких технологий и военно-промышленные комплексы. Ситуацию сравнивают периодом бурного развития в 1960-х гг. интегральной! микроэлектроники, так как появилась возможность со- I здания оптических микросхем по аналогии со схемами! микроэлектроники. Открылась возможность принципиально новых способов хранения, передачи и обработки информации на базе материалов нового типа, определены пути реализации оптических компьютеров с! тактовыми частотами порядка 1 ТГц. Предполагается! создание *лазеров* нового типа с низким порогом генерации.

Получение фотонных кристаллов

Однако создание трехмерных фотонных кристаллом (именно они должны привести к принципиальным изменениям в технике) является достаточно сложной задачей. Запре-

щенная, или стоп - зона (stop-band), может оказаться неполной: по некоторым направлениям электромагнитные волны данной частоты все же смогут распространяться. Между тем наиболее перспективные технические приложения связаны именно с существованием полной фотонной запрещенной зоны. Чтобы добиться нужного эффекта, меняют соотношение коэффициентов преломления n_1 и n_2 периодически чередующихся областей, составляющих фотонный кристалл, их размер и форму, геометрическое расположение в пространстве.

Наибольший технический интерес представляют возможности создания сверхрешеток для видимого диапазона волн, а также инфракрасной и ультрафиолетовой областей. Для

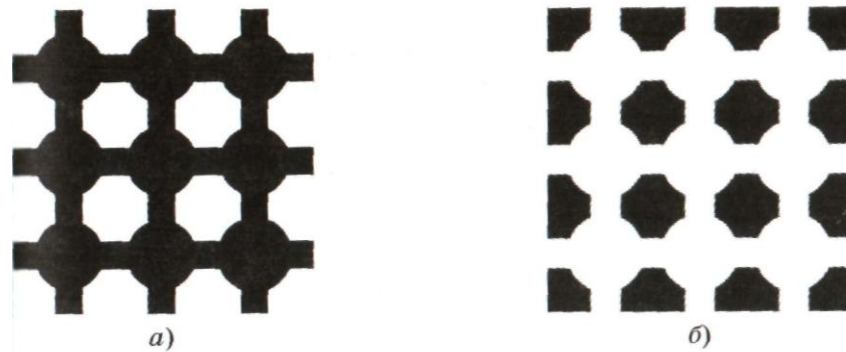


Рис. 5.2. *а* — модель кластерной решетки опала (кремнезем выделен темным);
б — реплика модели решетки опала (инвертированная решетка опала) [1]

этого нужно, чтобы периодически повторяющиеся области сверхрешетки имели размеры порядка микрона и находились строго на одинаковом расстоянии друг от друга. Выполнение этого условия вызывает большие технические трудности. Кроме того, необходима достаточно большая разница в значениях коэффициента преломления для матрицы и областей сверхрешетки.

Первую искусственную сверхрешетку для миллиметрового диапазона электромагнитных волн создал в 1989 г. Яблонович. Это был просто образец из диэлектрика с показателем преломления $n = 3,6$, в котором на расстояниях порядка 1 мм были просверлены под определенными углами каналы диаметром 1 мм. Пересечение каналов создавало периодически повторяющиеся полости. Этот классический объект получил название «яблоновит» в честь Яблоновича и являлся фотонным кристаллом для миллиметрового диапазона.

Во многих работах по созданию фотонных кристаллов моделью служит кластерная сверхрешетка опала. Опал является примером природного, хотя и не вполне совершенного фотонного кристалла. В нем периодическую решетку образуют достаточно крупные по сравнению с атомами кластеры кремнезема SiO_2 (рис. 5.2, *а*). Крупные кластеры, размером порядка сотен нанометров, могут, в свою очередь, состоять из более мелких, диаметром в десятки нанометров. Шарики кремнезема погружены в гелеобразную массу, состоящую в основном из SiO_2 . От названия опала произошел термин «опалесценция», или «опализация»: характерная игра света в благородном опале - одном из видов этого прекрасного камня.

Матрица между сферами занимает существенную часть объема, порядка 25%, что хорошо видно на рисунке 5.2.

Именно кластерная сверхрешетка опала служит моделью во многих работах по созданию искусственных I фотонных кристаллов.

Так, в 1996 г. российские ученые разработали технологию получения оптически совершенных синтетических опалов на основе микроскопических сфер из двуокиси кремния с полостями между ними. Меняя размеры сфер, можно варьировать период сверхрешетки и тем самым менять свойства фотонного кристалла. В одной из работ был использован принцип снятия реплики, т.е. отпечатка (инвертированная решетка опала): кремниевая реплика опала дает вместо микроскопических сфер пустоты такого же размера в некоторой матрице (рис. 5.2, б). Обработывая внутреннюю поверхность полости различными веществами, можно тем самым управлять коэффициентом преломления, а значит, и свойствами фотонного кристалла.

В настоящее время предложен ряд способов с а м о с б о р к и системы сферических микрочастиц в плотноупакованный фотонный кристалл. Например, используется подъем суспензии кварцевых или полимерных микросфер, погруженных в жидкость, за счет капиллярных сил вверх по подложке, на которой на определенных расстояниях нанесены искусственные «канавки» (рис. 5.3, а). Затем жидкость испаряется, и сканирующий электронный микроскоп фиксирует наличие упорядоченной структуры (рис. 5.3, б). Она используется как реплика для получения структуры, где вместо шариков - сферические полости.

Это типичный для нанотехнологии процесс «снизу вверх».

Другие способы получения фотонных кристаллов основаны на широко используемом в микроэлектронике методе *литографии* и соответствуют процессу «сверху вниз».

Заметим, что чем выше частота используемого электромагнитного излучения (меньше длина волны), тем труднее создать трехмерный фотонный кристалл с широкой запрещенной зоной: меньше технических возможностей и для создания сверхрешетки с малым периодом, и для нужного сочетания коэффициентов преломления n_1 и n_2 . В атомных кристаллических решетках очень мала вариация n , по этой причине запрещенные зоны в рентгеновском спектре крайне узки и практически не играют роли.

Фотонные кристаллы должны иметь очень однородную структуру. Поэтому японские ученые планируют отработать их технологию в условиях невесомости, на МКС. Проект рассчитан на 5 лет, его предварительная I стоимость около 5 млн долларов.

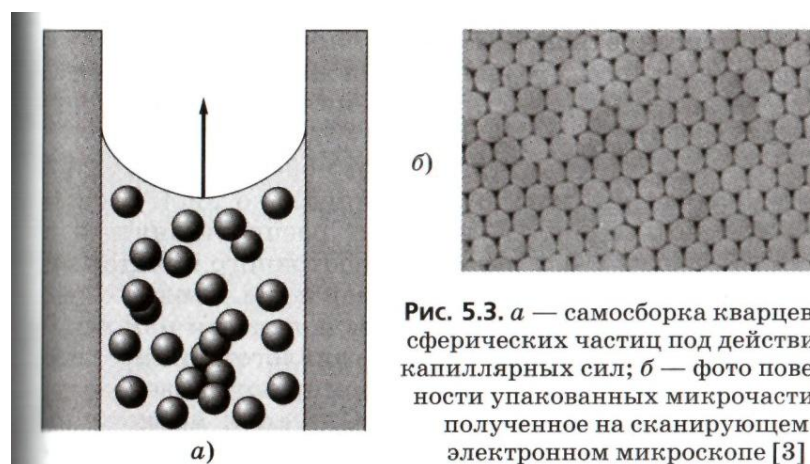


Рис. 5.3. а — самосборка кварцевых сферических частиц под действием капиллярных сил; б — фото поверхности упакованных микрочастиц, полученное на сканирующем электронном микроскопе [3]

Применение фотонных кристаллов

По-видимому, раньше всего фотонные кристаллы получают широкое применение в качестве *световодов*.

Еще 30 лет назад не было сотовых телефонов, Интернета и спутниковой связи. В наше время все точки Земли и ближайший космос связаны многочисленными каналами связи.

Для связи возможно использование радиоволн различных частот. В последние десятилетия стала быстро развиваться оптическая связь на основе волоконной оптики, которая позволяет пропускать по одному волокну десятки тысяч различных потоков данных. Свет по сравнению с электрическим током имеет колоссальное преимущество. При передаче информации с помощью света не возбуждаются дополнительные электрические и магнитные поля (помехи), всегда сопутствующими электрическому току. В свою очередь, окружающие электромагнитные помехи (шум) не искажают оптический сигнал. Без ретрансляторов и усилителей сигнал проходит тысячи километров. Высокая частота колебаний позволяет передавать большой объем независимой информации. Пропускная способность волокон фактически сдерживается только пропускной способностью электронных приборов на входе и выходе.

Принцип действия традиционных световодов основан на многократном *полном внутреннем отражении света* за счет того, что внутренняя жила световода имеет больший показатель преломления, чем поверхностные слои.

В случае фотонных кристаллов передача энергии по световоду происходит по принципиально иному механизму. Световые волны не могут распространяться в поверхностных слоях световода (фотонного кристалла) за счет наличия в них запрещенной зоны. Вместе с тем имеющиеся внутри такого световода полости или нерегулярности структуры делают его аналогом примесного полупроводника. Именно так формируются световодящие каналы внутри световода. Ситуация аналогична распространению электрического тока по металлическому проводу с изолирующей обмоткой. Важно, что такой механизм передачи энергии позволит сгибать световод под любым углом, в то время как для обычного световода даже изгиб под прямым углом приводит к существенной потере энергии из-за нарушения условия полного внутреннего отражения. Сгибая классический световод, необходимо выдерживать на сгибах радиус кривизны порядка 10 длин волн, световод на основе фотонного кристалла может иметь на сгибе скругление радиусом до половины длины волны.

Для микроэлектроники этот геометрический фактор очень существен, так как световоды в микросхемах надо многократно сгибать, укладывая их в небольшом объеме.

Применяемые волоконные световоды прозрачны только в узком диапазоне длин волн, в фотонном кристалле более широкий диапазон частот позволит увеличить поток независимой информации.

Интерес к фотонным проводникам связан, в частности, еще и с тем, что в них не выделяется тепло. Между тем тепловыделение - одно из главных препятствий на пути увеличения плотности интегральных схем и тактовой частоты.

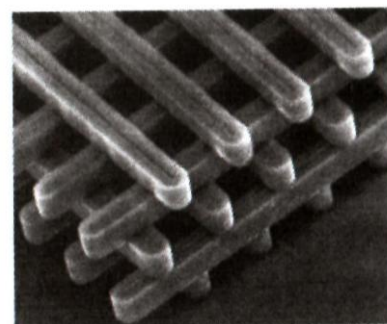


Рис. 5.4. Фотонный кристалл «дровяная поленница»

Также проблемой является взаимная *самоиндукция*, характерная для высокочастотных электронных устройств. Для потоков света эта проблема не возникает.

Эффективность передачи в уже созданных фотонных кристаллах типа «поленницы» (рис. 5.4) со световедущими каналами в виде нерегулярностей структуры составляет 95%; для стандартных светопередающих сред этот показатель около 30%.

Еще один принцип создания новых световодов использует уже отработанную волоконно-оптическую технологию, в которой кварцевая легированная заготовка в виде стержня протягивается при температуре 2000 °С. В частности, в кварцевую трубку диаметром 20 мм упаковывают капилляры диаметром около 1 мм, причем упаковка капилляров в поперечном сечении имеет гексагональную структуру, выгодную для фотонного кристалла. Вытяжка уменьшает поперечный размер в тысячи раз.

Примерная структура оптоволокон нового типа показана на рисунке 5.5. Часть волокон имеет полую световедущую жилу в центре, в них используется тот же принцип, что для световодов на основе «поленницы». В других, со сплошной центральной световедущей жилой, механизм проводимости смешанный (частично полное внутреннее отражение, частично использованной запрещенной фотонной зоны).

Фотонно-кристаллические световоды (ФК световоды) - перспективный элемент различных сенсоров. Оптические характеристики ФК световодов изменяются при механическом, тепловом и других воздействиях. При этом возможен прием сигнала на значительном расстоянии от места измерения, а высокая радиационная и коррозионная стойкость делают систему надежной.

Реальная уже в ближайшее время область применения фотонных кристаллов - повышение на порядок эффективности ламп накаливания. У ламп накаливания, используемых в настоящее время, только 5% выделяемой энергии попадает в диапазон видимой части спектра, остальная энергия выделяется в виде ненужного и даже вредного тепла. (В каче-



стве примера взята лампа с вольфрамовой нитью накаливания, позволяющая обеспечить нагрев до 2000 °С.) Идеальным материалом для источника света мог бы послужить фотонный кристалл, для которого инфракрасный диапазон попадает в запрещенную зону, в результате основная часть энергии излучается в видимой области спектра. Недавно на этом пути был предложен перспективный материал, представляющий «губку» из тугоплавкого металла (того же вольфрама), погруженного в воздух или другую диэлектрическую среду. Период этого 3D-фотонного кристалла равен 4,2 мкм при толщине элементов структуры в 1,2 мкм. Очень широкая запретная зона в диапазоне от 8 до 20 мкм позволила повысить эффективность лампы накаливания до 60% .

Вероятно, в ближайшее время будут использоваться сочетания традиционных полупроводниковых устройств и устройств на базе фотонных кристаллов. В будущем планиру-

ется переход на компьютеры, основание исключительно на фотонике. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с компьютерами, основанными на электронике. Однако для построения полноценно оптической системы необходимо иметь чисто оптические устройства, обеспечивающие преобразование Обработку информации. Одна из задач - создание *нелинейных оптических материалов* (НОМ), позволяющих управлять светом также с помощью света (оптическая коммутация). Работы в этой области ведутся, но пока оптические коммутаторы имеют слишком большие размеры.

Фотонные полупроводники предполагается использовать для управления световыми потоками, за счет изменения положения и ширины запрещенной фотонной зоны. Например, в фотонных кристаллах-репликах с искусственных опалов полости покрыты веществом, меняющим коэффициент преломления под действием электрического и магнитного поля, что позволяет управлять положением запрещенной зоны.

Была решена еще одна важная проблема для полупроводниковых лазеров. Обычный многокаскадный полупроводниковый лазер представляет собой 1D-структуру из нанометровых слоев полупроводника и излучает во все стороны параллельно плоскостям слоев. Ученым с помощью уникальной электронно-лучевой литографической установки удалось нанести на слои полупроводника гексагональную структуру фотонного кристалла. В итоге лазер излучает в направлении, перпендикулярном слоям полупроводника, и ему не нужны дополнительные устройств фокусировки. Это расширяет область его применения. Заметим, что размеры нового лазера на фотонных кристаллах не превышают 50 мкм, что примерно вдвое тоньше диаметра человеческого волоса.

Фотонные кристаллы в природе

Неоднократно случалось, что, открыв новый эффект, исследователи обнаружат нечто подобное в живой природе. Природа сферических кластеров, формирующих опал, возможно, связана с минерализацией таких микроорганизмов, как диатомеи или радиолярии.

Австралийские ученые обнаружили причину эффекта яркого, радужно переливающегося «меха» у глубоководного морского червя морской мыши, *genus Aphrodite*), представленного на рисунке 7 на цветной вклейке. Мех способен отражать почти со 100%-и эффективностью во всей видимой области спектра – от красного до голубого. Сканирующий электронный микроскоп показал, что ворсинки того меха обладают 2D-периодической структурой, вероятно, с неполной запрещенной зоной. Оказалось, то радужные переливы на чешуйках и перьях ряда животных объясняются не столько цветом их пигментов, сколько их периодичной структурой фотонного кристалла. Видимо, в животном мире такие эффекты связаны с привлечением полового партнера или устрашением врага.

Бельгийско-венгерская группа ученых с помощью электронной микроскопии продемонстрировала упорядоченную структуру в виде ренета с отверстиями субмикронных размеров на крыльях самцов тропических бабочек (рис. 8 на цветной вклейке). Оказалось, что эта структура, кроме всего прочего, снижает поглощение света и вредный разогрев крылышек. Эволюция тех же бабочек, живущих в более холодных климатических поясах, привела к потере красивого сине-фиолетового перелива крылышек – структура фотонного кристалла на них исчезла, и крылышки приобрели коричневый цвет. Одновременно появился дополнительный источник тепла за счет поглощения крылышками энергии солнечного света. Обнаружившие это явление ученые предполагают, что такое влияние фотонно-кристаллической структуры на тепловой баланс поверхности можно использовать в за-

щитных скафандрах для космоса и работы в пустынях.

Предполагают, что удивительные переливы некоторых драгоценных восточных ковров, которые юные мастерицы ткут годами, также определяются не только цветом нитей, но и поверхностной структурой. Делаются попытки создания по этому принципу новых типов тканей.

Опал замыкает ряд драгоценных камней, нашедших применение в оптико-квантовых технологиях. Название его произошло от слова «упала», в переводе с санскрита – «Драгоценный камень». Первый лазер (оптический диапазон длин волн) был создан в 1960 г. на кристалле рубина. На основе кристаллического александрита появились перестраиваемые твердотельные иттрия – алюминиевого граната. Красота драгоценных камней сочетается с их перспективностью для современной техники.

Поэзия! Завидуй кристаллографии!

Кусай ногти в гневе и бессилии!

О.Э. Мандельштам

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключаются особенности дифракции волн на двухмерной решетке? На трехмерной?
2. Возникают ли запрещенные зоны при дифракции рентгеновского излучения на кристаллической решетке?
3. Почему инфракрасная область электромагнитных волн с длиной волны около 1,5 мкм представляет особый интерес при создании фотонных кристаллов?
4. В чем общая природа возникновения запрещенных зон для электронов и фотонов в кристаллах?
5. В чем заключается различие в передаче света по традиционному световоду и по фотонному кристаллу?

Задания

1. Оформите стенд, посвященный перспективам применения фотонных кристаллов в технике.
1. Подготовьте сообщение о фотонных кристаллах в живой природе.
2. Подберите иллюстрации и сделайте плакат о современных методах получения фотонных кристаллов.

Литература

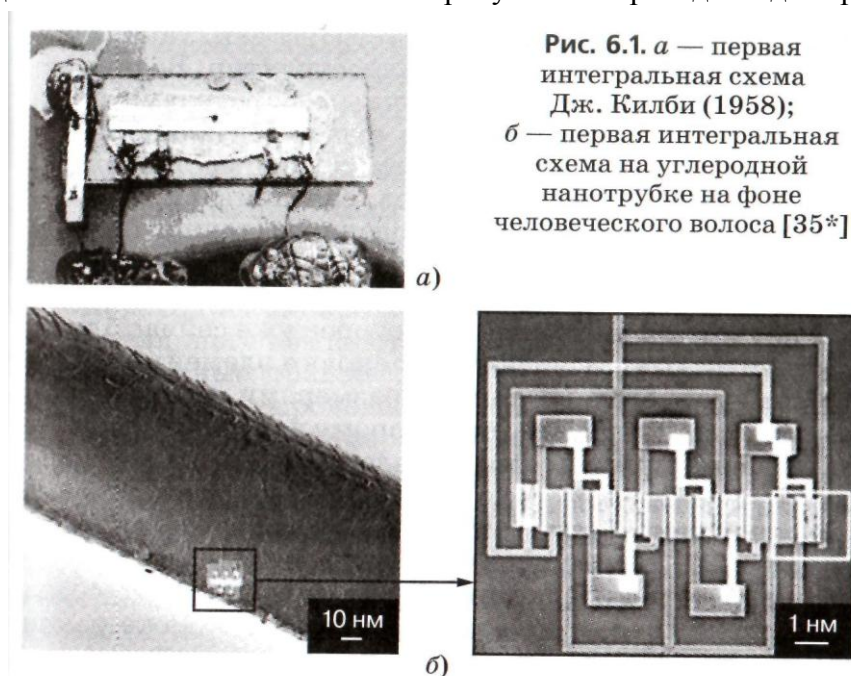
1. *Жувикин Г.* Лабиринты фотонных кристаллов//**Компьютерра**. 2001. №30.
2. *Кособукин В. А.* Фотонные кристаллы//Окно в микромир 2002. №4.
3. *Звездин А.К.* Квантовая механика плененных фотонов. Оптические микрорезонаторы, волноводы, фотонные кристаллы//Природа. 2004. № 10.
4. *Потапов В.Т.* Фотонные кристаллы и оптические волокна на их основе.
<http://www.integrakabel.ru>
5. *Крашенинников А. П.* Радуга на крыльях фотонных кристаллов.
<http://www.phys.veb.ru>

Занятие 7.

Лекция: Нанoeлектроника

Микро- и нанoeлектроника

После принципиального шага в развитии электроники – перехода к *интегральным схемам* – в соответствии с законом Мура шел процесс дальнейшей миниатюризации устройств и уменьшения их электропотребления. Например, в ближайшие годы предполагается уменьшение размера микрофона мобильного телефона настолько, что он будет сопоставим с толщиной человеческого волоса. На рисунке 6.1 приведены для сравнения фото-



тографии первой интегральной схемы Дж. Килби (1958) и первой интегральной схемы на одной углеродной нанотрубке (2006). Плотность информации в устройствах современной нанoeлектроники сопоставима с плотностью информации, зашифрованной в ДНК.

Специалисты области микроэлектроники обоснованно называют её развитие одним из стратегических направлений мирового научно-технического прогресса. Именно развитие микроэлектроники сделало возможным реализацию идей нанотехнологии и послужило одним из объективных факторов, вызвавших третью научно-техническую революцию. И в настоящее время электроника является основной практической областью применения нанотехнологии. Вместе с тем нанoeлектроника отличается от микроэлектроники рядом существенных моментов. Это совершенно новая область науки и техники, которая использует быстродействующие и сверхминиатюрные системы, функционирующие на основе квантовых эффектов. Удивительные новые возможности нанoeлектроники сопровождаются неизвестными ранее трудностями, связанными с квантовой природой процессов в её устройствах. Такая ситуация вообще характерна для наноструктур. Возникают проблемы, связанные с различными пределами (ограничениями), обусловленными фундаментальными законами физики: предел однозначного представления и обработки информации; предел, связанный с тепловым делением; предел терминированного (точного) управления устройствами и т. д.

Например, серьезную проблему для компьютеров составляет тепловыделение, которое уже сейчас близкая к критическому. Плотность упаковки элементов на чипе лимитируется не только размерами атомов, но и принципом Ландауэра, по которому потеря каждого бита информации поводит к выделению тепла в количестве $k_B T \ln 2$, где k_B – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, $\ln 2 \approx 0,7$. Чем больше скорость компьютера, тем больше тепловыделение. Для борьбы с перегревом в суперкомпьютерах предлагается создавать локальные низкие температуры или даже размещать на компьютере на геостационарных орбитах, используя низкую температуру космоса. Выгодная особенность оптических компьютеров как раз состоит в том, что в них свет проходит через оптическую систему практически без тепловыделения, тепло выделяется только в детекторах, считывающих информацию.

Именно тепловыделение создает основные трудности для реализации суперкомпьютера с частотой 3 – 10 квадриллионов (10^{15}) в секунду (3–10 petaflops). Группа японских компаний надеется достичь такого предела к 2011 г. за счет проекта в 700 млн долларов. В 2006 г. в Иокогаме был продемонстрирован петафлопный суперкомпьютер MDGrape-3 с рекордной теоретической производительностью 1 квадриллион операций в секунду. Специалисты компании «IBM», одного из лидеров в области суперкомпьютеров, сравнивают производительность такой системы с производительностью стопки ноутбуков высотой около 2400 м.

Стоит вспомнить, что первая электронно-вычислительная машина ENIAC, созданная в 1946 г. «IBM» по заказу Министерства обороны США, производила 5 тыс. операций в секунду. При этом она весила 30 т и состояла из 18 тыс. электронных ламп.

Еще один пример физического предела, связанного с переходом к наноразмерам, – предельная толщина изолирующего слоя оксида кремния в транзисторе. Если слой тоньше 1,5–2 нм (4–5 молекул), возникают неконтролируемые туннельные переходы и перегревы.

В кратком изложении трудно описать все проблемы и перспективы нанoeлектроники. Выделим нижеследующие.

Переход на наноразмеры поставил задачу создания молекулярного компьютера, который должен включать молекулярные транзисторы, наноустройства памяти, наноразмерные проводы. Если молекулярный транзистор будет размером порядка 1 нм (3–5 размеров атома), плотность размещения элементов электроники возрастет по сравнению с нынешней в 10 тыс. раз. Однако нанотранзистор – это квантово-механическое устройство, и протекающий через него ток нельзя рассматривать как непрерывный поток электронной «жидкости»: он дробится на небольшое число электрических зарядов. Конструирование и использование нанотранзистора базируются на законах квантовой механики и достаточно сложны.

Любой транзистор представляет собой систему, в которой можно управлять силой тока между двумя элементами влиянием на них третьего элемента. Молекулярный транзистор может представлять собой всего одну молекулу с переменными электрическими свойствами. Таким образом, в ней будут совмещены все три элемента транзистора. Например, молекула фотохромного соединения меняет свою конфигурацию в результате электрохимического окисления. Уже созданы нанотранзисторы на основе углеродных нанотрубок, фуллеренов и пр.

В микроэлектронике в транзисторах используется полупроводник, так как в нем легко

управлять концентрацией носителей заряда. Но полупроводниковыми свойствами могут обладать также кластеры металла при определенном числе атомов в них. Для стабильности системы берутся кластеры с магическим числом атомов.

Полученные результаты научных исследований пока не привели к созданию массовой технологии нанотранзисторов, но ведущие лаборатории мира и крупнейшие фирмы в области электроники ведут активную работу и не расшифровывают полностью свои практические разработки, имеющие большое экономическое и военное значение.

Важная составляющая молекулярного компьютера – память – будет четко разделяться на оперативную, быстродействующую, и память более «медленную», но зато с длительным хранением информации. Отдельным элементом памяти также может быть отдельная молекула, которая под внешним воздействием (например, лазерного излучения) меняет свое состояние. Два состояния молекулы соответствуют двоичному коду. В этом случае возможны проблемы, связанные с самопроизвольным переходом молекулы в другое состояние из-за теплового движения или туннельного перехода, что приведет к потере информации.

И наконец, еще одна необходимая составляющая молекулярного компьютера – нанопровода, соединяющие все его элементы. Здесь выдвигаются различные варианты. Один из них – использование углеродных нанотрубок, в том числе наполненных атомами металла. Возможно использование макромолекул полимеров, проводящих электрический ток. В 2005 г. в журнале «Nature» появилось сообщение о «микробной нанопроволоке», которую вырабатывают микроорганизмы *Geobacter* (рис. 6.2). Они при переработке отходов сточных вод превращают химическую энергию в электроэнергию. Этот процесс сопровождается построением электропроводящих структур. Заметим, что планируется использование колоний этих бактерий для биологической очистки воды от химикатов, нефти и тяжелых металлов, а также для получения батарей нового типа, актуальных для глубоководных сенсоров. Появлялись сообщения о металлизации паутины, нитей дрожжевых белков и пр.



Рис. 6.2. Бактерия *Geobacter* создает нанопровода для переноса электронов
[www.geolacter.org]

Во всех случаях главной остается проблема присоединения нанопровода к другим наноэлементам молекулярного компьютера. Для массовой технологии таких способов пока нет. Надежды, как часто в нанотехнологии, связаны с развитием механизмов самоорганизации.

Разновидностью молекулярного компьютера является биологический компьютер, все части которого построены из биомолекул. В частности, им активно занимается Американское агентство оборонных перспективных исследовательских разработок «DARPA» (именно в его недрах родился Интернет).

Возможно, в будущем подобные устройства будут вживляться в человеческий организм в качестве постоянного активного сенсора.

Одноэлектронный транзистор

Больших успехов физики добились в создании одноэлектронных транзисторов начи-

ная с 90-х гг. XX в.

Переход элементов электроники на наноразмеры поставил задачу передачи и обработки информации за счет использования отдельных частиц (электронов, фотонов). В микроэлектронике измеряется сила тока – потока электронов, который можно рассматривать как поток сплошной электронной «жидкости». В наноэлектронике ток в принципе состоит из квантовых частиц, и существенными для надежности информации становятся флуктуации (случайные отклонения) силы тока. Чтобы остаться в рамках классической информатики с ее битами, надо перейти к передаче информации с помощью одного электрона и решить задачу его фиксации. В вакууме регистрация отдельных частиц ис-1 пользуется давно, но в твердом теле на отдельный 1 электрон действует слишком много факторов, от различных дефектов до тепловых колебаний. Следовательно, электрон должен быть связан не с макроскопическим твердым телом, а с кластером. Электроемкость кластера мала, и энергия связи электрона с ним оказывается достаточно велика по сравнению с энергией теплового движения. Если еще понизить температуру до температуры жидкого гелия (4,2 К), мы получим для кластера в 20-30 нм одноэлектронный транзистор. При комнатных температурах создание одноэлектронного транзистора потребует уменьшения кластера до 1-2 нм. Тем не менее такие работы выполняются, в том числе российскими учеными [4].

Новая логика

В обычных компьютерах используется логика, основанная на двоичной системе. Это условие было заложено в принципиальную схему компьютера еще Д. фон Нейманом. Логика, по которой работает мозг животных и человека, видимо, более сложена.

Биологический компьютер – один из вариантов создания новой логики. В развивающихся схемах *нейросетей* отдельные операции производятся не последовательно, а параллельно. Новая логика будет развиваться также на основе *клеточных автоматов* и *квантовых компьютеров*, каждый из которых предназначен для эффективного решения своего круга задач.

В клеточных автоматах состояние каждого элемента определяется текущим состоянием соседних элементов. Это имитация коллективного поведения клеток в организме, изящно реализованная в известной интеллектуальной игре «Жизнь» [7, 8]. В этой игре на клетчатой бумаге первоначально закрашиваются те клетки, которые считаются «живыми». Вокруг каждой клетки есть 8 ближайших. В каждом последующем шаге «умирают» те клетки, вокруг которых из 8 соседей оказалось слишком много «живых» (больше трех) или слишком мало (меньше двух). В свою очередь, «оживают» те клетки, около которых оказываются 3 живых. Развитие такой системы в целом можно наблюдать на сайте [8]. Клеточные автоматы окажутся полезными для таких компьютерных функций, как, например, распознавание образов или сверхстойкое шифрование. Они могут быть созданы на базе взаимодействующих наноэлементов (квантовых точек, наноманитов), образующих сверхрешетку. В одном из лабораторных вариантов был изготовлен подобный клеточный автомат в виде «бестранзисторного» процессора на основе железно-никелевых наноманитов на никелевой подложке. Как известно, одним из достоинств магнитной памяти является то, что она сохраняется в отсутствие электричества. Плюсом является также малый размер наноманитика. В Японии ведутся работы по созданию клеточного автомата из нанометровых компонентов, которые надеются создать за счет самоорганизации в процессе

химического синтеза.

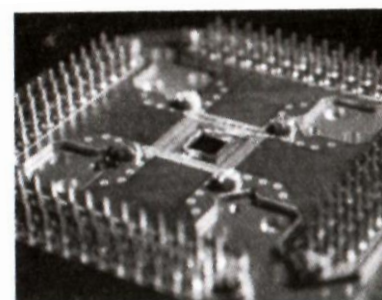
Одно лишь уменьшение размеров транзисторов и использование квантовых закономерностей при их работе не приведет к созданию квантового компьютера. Переход к квантовому компьютеру требует изменения представлений о характере информации. Основой нового подхода к информации для квантового компьютера является квантово-механическое представление о состоянии физического объекта.

Классический бит основан на физической системе, находящейся в одном из двух состояний, которым приписывается значение «1» - «0» («да» - «нет»). Примером может быть атомный магнетик, ориентированный или по , или п р о т и в внешнего магнитного поля. Если он находится в одном состоянии с вероятностью, равной 1, то при этом вероятность его нахождения в другом состоянии равна 0.

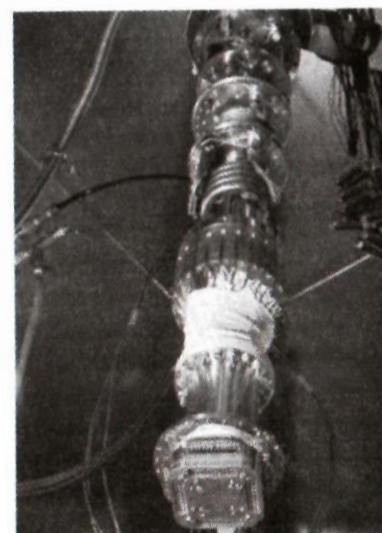
В квантовой механике состояние системы представляет собой суперпозицию (сложение с разной вероятностью) двух базовых состояний, соответствующих значениям «0» и «1». Система находится как бы сразу в обоих состояниях, но с разной степенью вероятности. Изменение состояния происходит за счет изменения этой вероятности. Информация в квантовом компьютере представляется такой квантовой системой, квантовым битом или кубитом (*quantum bit, qubit*). В качестве физических носителей квантовых битов (кубитов) могут быть ионы, фотоны, атомы, ядерные спины, в том числе в твердой матрице, эндодральные молекулы фуллеренов.

Интерес к квантовому компьютеру объясняется колоссальной скоростью вычислительных операций по сравнению с классической логикой. Чтобы промоделировать N операций квантового компьютера, обычному компьютеру понадобится 2^N операций. Идея о квантовых вычислениях принадлежит советскому математику Ю. И. Манину (1980). Толчком к активным обсуждениям стало высказывание Р. Фейнмана (1982), что система из N квантовых двухуровневых элементов (элементов с двумя базовыми состояниями) может быть задана с помощью 2^N классических битов, что может оказаться невозможным для обычного компьютера. Отсюда был сделан обратный вывод, что сложные («невычисляемые») задачи, практически недоступные компьютеру с обычной логикой, могут быть решены на квантовом компьютере. В частности, это моделирование процессов в приборах и устройствах нанoeлектроники, моделирование процессов в сложных молекулярных и биологических системах. Р. Фейнман предложил первую теоретическую схему квантового компьютера.

Однако некоторые задачи, решаемые с помощью классических компьютеров, на компьютере квантовом



а)



б)

Рис. 6.3. Квантовый компьютер «Орион» на 16 кубитах:
а — внешний вид;
б — процессор с криогенной системой охлаждения.
Фото J. Chung, D-Wave Systems

требуют не меньшего времени. Академик К. А. Валиев пишет: «По-видимому, место квантовых компьютеров в компьютерном мире XXI в. можно определить следующим образом: они не вытесняют, а дополняют существующий компьютерный мир» [10*].

По сложности задачу создания квантового компьютера сравнивают с реализацией проекта межзвездных перелетов. На настоящий момент теоретические возможности квантового компьютера известны достаточно хорошо, разрабатываются все новые алгоритмы их создания. Но реально долгое время удавалось создавать только системы из нескольких кубитов. Задача присоединения каждого нового кубита к системе в общем случае не решалась, в конкретных экспериментах каждый раз ее решали индивидуально.

Однако в феврале 2007 г. в музее истории компьютеров в Силиконовой долине США канадская компания «D-Wave Systems» презентовала квантовый компьютер «Орион» из 16 кубитов (рис. 6.3). Одна квантовая операция на нем эквивалентна 65 536 операциям на обычном компьютере. Правда, он пока каждую свою операцию выполняет в тысячу раз медленнее обычного персонального компьютера.

Около 4 млрд состояний могут образовать 32 кубита, а при наборе из 300 кубитов квантовый компьютер в принципе способен найти 2^{300} возможных решений – это число примерно равно числу всех элементарных частиц во Вселенной.

Для того чтобы создать квантовый компьютер на N кубитах, необходимо иметь N частиц, например электронов, строго в одном и том же квантовом состоянии. Но электронам это запрещает так называемый *запрет Паули*. Канадские ученые использовали одинаковые пары электронов в сверхпроводнике при температуре, предельно близкой к абсолютному нулю. При таких температурах электроны объединяются в пары с противоположными спинами, так что суммарный спин такой пары равен нулю, и она уже не подчиняется запрету Паули.

С «Орионом» в день презентации можно было связаться через Интернет и дать ему задачу. «Орион» рассматривался многими специалистами как первый коммерчески жизнеспособный квантовый компьютер.

Возникающее при взаимодействии кубитов *запутанное состояние* является основой **телепортации** – передачи квантового состояния двухуровневой системы неизвестного отправителя A к получателю B без реального перемещения системы. В свою очередь, телепортация дает принципиально новый метод *криптографии*, (столь важный для обеспечения технических, военных,) политических секретов.

Недавно на мировом рынке появились генераторы I случайных чисел и дистрибьюторы («обменники») с секретными ключами, использующие квантовые алгоритмы (но не квантовый компьютер).

Физические основы памяти

Объединение компьютеров в информационные сети привело к слиянию компьютерной и телекоммуникационной технологий. Растет потребность в обеспечении хранения больших массивов информации и параллельно – в улучшении оперативной памяти (ее скорости и стабильности). Использование спинтроники позволит сделать память нанокомпьютера не только с высокой плотностью записи информации, но и энергонезависимой (не стираемой при отключении электропитания).

Кроме рассмотренной выше магнитной памяти, в стадии разработки находится наномеханическая память. Ее основная ячейка представляет собой наноструну, которая при

определенной амплитуде внешнего высокочастотного напряжения принимает одно из двух состояний.

В ряде лабораторий мира разрабатываются основы оптической, *голографической* памяти (трехмерной). Специалисты полагают, что переход к трехмерной записи и считыванию информации, в отличие от сегодняшней двумерной (на поверхности носителя), позволит на несколько порядков увеличить плотность записи. Один из вариантов трехмерной памяти основан на одновременном использовании двух лазеров, излучение которых действует на разной глубине элемента памяти. Но чтобы такая память стала «молекулярной», т. е. область воздействия лазеров была по величине сравнима с 1 нм, необходимы лазеры с очень короткой длиной волны, например лазеры, работающие в ультрафиолетовом диапазоне, что пока проблематично.

Получены трехмерные структуры ДНК, которые можно использовать для создания трехмерных элементов нанoeлектроники. Предлагаются экзотические варианты памяти, например с использованием вирусов табачной мозаики, на поверхность которых внедрены наночастицы платины. Среди множества лабораторных разработок постепенно выкристаллизовываются технически и экономически перспективные.

Полупроводниковые гетероструктуры и сверхрешетки

На полупроводниковом гетеропереходе скачком меняется ширина запрещенной зоны и другие электрические характеристики. Граница двух полупроводников при этом должна быть по возможности без структурных дефектов и механических напряжений. Это возможно при практическом совпадении кристаллической структуры двух полупроводников *A* и *B* (гетеропары *A/B*), например для GaAs/AlAs. В этом случае их кристаллические структуры аккуратно «сшиваются».

Прогнозируется [1], что электроника еще долгое время будет основываться преимущественно на гетероструктурах. Ведущим исследовательским центром в области полупроводниковых наноструктур в России является Физико-технический институт РАН.

Гетероструктуры позволили получить современные инжекционные лазеры, создать детекторы инфракрасного излучения, улучшить характеристики транзистора – основного элемента микроэлектроники – и т. д. Их применение позволяет создавать принципиально новые приборы и улучшать характеристики старых. Гетеролазеры используются в CD-плеерах, лазерных принтерах, в высокоскоростной волоконной связи. Гетероструктуры используются в фотодетекторах, в солнечных элементах. Международная космическая станция при введении в строй всех солнечных батарей станет самым ярким небесным телом после Луны. Светодиоды позволят решить проблему экономичного освещения: в настоящее время на освещение помещений, улиц, заводов и пр. тратится около 20% всей получаемой в мире энергии.

Гетероструктуры не только служат основой многих современных устройств и приборов, они широко используются в физическом эксперименте, и с их помощью уже сделан ряд открытий в квантовой электронике.

Если размеры гетеропереходов меньше 100 нм – это уже наноструктура. Современная технология формирует такие наноструктуры с атомарной точностью, что позволяет ввести термины «инженерия зонной структуры» и «инженерия волновых функций». В 1970 г. Л. Эсаки и Р. Цу создали первую искусственную сверхрешетку – периодически расположенные в полупроводнике квантовые ямы и барьеры. Это было началом практической инже-

нерии зонной структуры.

Свойства гетероструктуры, т. е. расстояние между потенциальными барьерами и ямами, их высоту, регулируют за счет размеров наноструктур, их химического состава, формы, а также воздействием различных внешних полей (электрических, магнитных, электромагнитных).

Основные материальные элементы современной электроники

Основные элементы «наноконструктора» для электроники – это нанокристаллы разной размерности. Напомним, что верхним масштабом при определении размерности является 100 нм. Размеры квантовой точки в трех направлениях меньше этой величины, поэтому она и называется точкой. Квантовый провод (нанопроволока) в двух направлениях меньше этой величины, это аналог линии в геометрии. Наконец, квантовый слой, наноповерхность, имеет наноразмеры только в одном направлении, это двумерная система. Кроме того, нанoeлектроника использует квантовые диски, а последнее время – разветвленные углеродные нанотрубки (рис. 6.4). В наноразмерных структурах сказывается волновая природа носителей заряда, электронов и дырок. Физические свойства систем с разной размерностью могут существенно отличаться.

Новое направление в нанoeлектронике - использование квантовых нанопроводников как основного направления своеобразной «проводной» нанoeлектроники. В начале 90-х гг. XX в. появился термин «металлическая нанoeлектроника». Ее элементной базой являются металлические квазиодномерные (размерами в двух других измерениях можно пренебречь) провода - микроконтакты. За счет наноразмеров они проявляют квантовые свойства проводимости уже при комнатных температурах. Наиболее интенсивно проводили исследования в этой области Япония и компания «IBM», стоявшая у истоков нанoeлектроники. Вероятно, элементы металлической нанoeлектроники найдут применение в СВЧ-технике.

Компания «HP» («Hewlett-Packard») разрабатывает новую стратегию развития базы нанoeлектроники, в основе которой лежит концепция построения архитектуры чипов нового типа. Это «узловая» архитектура из пересекающихся нанопроводников с регулируемыми мостиками между ними (см. рис. 8.10). Производство таких чипов должно стать дешевле обычных кремниевых.

Новые материалы

Нанoeлектроника нуждается в принципиально новых материалах и технологиях. «Король» микроэлектроники кремний вынужден уступать свои позиции. Однако твердотельные кремниевые микросхемы обладают высокой надежностью, в этом с ними пока трудно конкурировать. Кроме самого кремния и его оксида, используются силициды тугоплавких металлов и силициды металлов VIII группы таблицы Д. И. Менделеева. Они имеют высокую проводимость и высокую термостабильность. Более компактные и быстродействующие чипы компания «IBM» создает также с использованием напряженного кремния, напряженного германия либо их гибридных сочетаний. Механическое напряжение увеличивает подвижность носителей заряда и величину тока через транзистор.

Заложены основы использования углеродных нанотрубок с их уникальными электри-

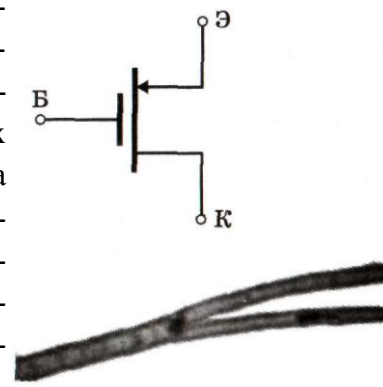


Рис. 6.4. Y-образная трубка в роли транзистора

ческими свойствами. Ветвящиеся нанотрубки предлагают использовать для создания различных функциональных наноэлементов, в том числе нанотранзисторов. Одна Y-образная трубка может служить транзистором – самым маленьким в мире. Компания «IBM» в 2006 г. собрала целую интегральную схему на единственной свернутой в кольцо однослойной нанотрубке (см. рис. 6.1).

Конкурентом углеродным нанотрубкам выступает новый материал – графен. В принципе можно будет построить интегральную схему целиком из графена без проводящих мостиков между элементами, что упростит технологию и существенно уменьшит энергопотери. В лабораториях уже созданы транзисторы и небольшие электронные схемы на графене.

Технологии

Новые материалы и устройства наноэлектроники требуют развития новых нетрадиционных технологий и усовершенствования старых. При этом важна не только высокая точность в получении наноструктур и устройств на их основе, но и экономически выгодная массовость производства. С этой точки зрения старая технология «сверху вниз» при требуемом усовершенствовании может стать очень дорогой. Классическая литография, даже при использовании коротковолнового рентгеновского излучения, дает большой процент брака уже при размерах 10-20 нм. Характерный для нанотехнологии принцип «снизу вверх» только начинает развиваться в виде различных вариантов процессов, пока еще далеких от промышленного внедрения. Тем не менее, некоторые конкретные производства уже сделали «рывок» в этом направлении, например производство световодов на основе фотонных кристаллов.

Одним из технологических направлений в наноэлектронике является использование зондовых технологий. Классическим является метод локального зондового окисления. Он используется для локального изменения свойства твердой подложки и для изготовления активных элементов наноэлектроники. В этом методе между зондом и подложкой создается такое электрическое поле, которое активирует различные физико-химические процессы.

Их итогом является образование оксида, толщина слоя которого зависит от приложенной разности потенциалов и длительности процесса.

Другой метод, метод «погруженного пера», позволяет рисовать на подложке, используя в качестве «чернил» золото, ДНК, органические красители, проводящие полимеры и пр.

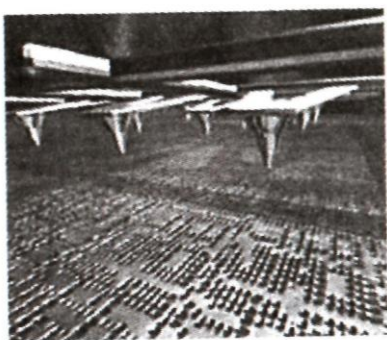


Рис. 6.5. «Многоножка»
(фото «IBM»)

Существуют технологии зондового механического воздействия (давления) на подложку или термического воздействия. Их сочетание составляет основу работы запоминающего устройства «многоножка» фирмы «IBM» (рис. 6.5), которая является примером многозондового матричного устройства (см. гл. 1). Представленный в 2005 г. на выставке в Ганновере чип «многоножки» размером $6,3 \times 6,3$ мм² содержал 4096 кантилеверов. На такую «многоножку» размером с почтовую марку можно записать содержимое 25 DVD-дисков. По прогнозу «IBM», она заменит Flash-память.

Посвященные «многоножке» статьи озаглавлены «Перфокарты возвращаются». В старых вычислительных машинах в бумажных перфокартах отверстие или отсутствие отверстия обеспечивали двоичный код «1» - «0» («да» - «нет»). В новой памяти нанозонды проплавливают ямки диаметром 10 нм на расстоянии 100 нм друг от друга в специальной полимерной пленке. Когда зонд попадает в ямку, он охлаждается, и его электрическое сопротивление изменяется. Этого достаточно для определения бита информации. Зонд может стереть информацию, заплывив ямку.

Роль процессов самоорганизации

Перспективный путь в развитии стратегии «снизу вверх» - изучение и использование процессов самоорганизации, в пределе – самовоспроизводства. Метод получения различных наноструктур (нанопленок, нанопроволок, наноточек) на поверхности полупроводниковых кристаллов за счет самосборки из адсорбированных атомов получил дальнейшее развитие в работах российских ученых [11]. На рисунке 6.6 приведено изображение, полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа, упорядоченного массива магических нанокластеров алюминия и нанопроволок меди на поверхности кремния. Напомним, что для практических применений очень важно получение однородной наноструктуры, подобно той, что демонстрирует рисунок 6.6, *а*.

Ведутся работы в области химической самосборки элементов нанотехнологии. При этом используются идеи фон Неймана.

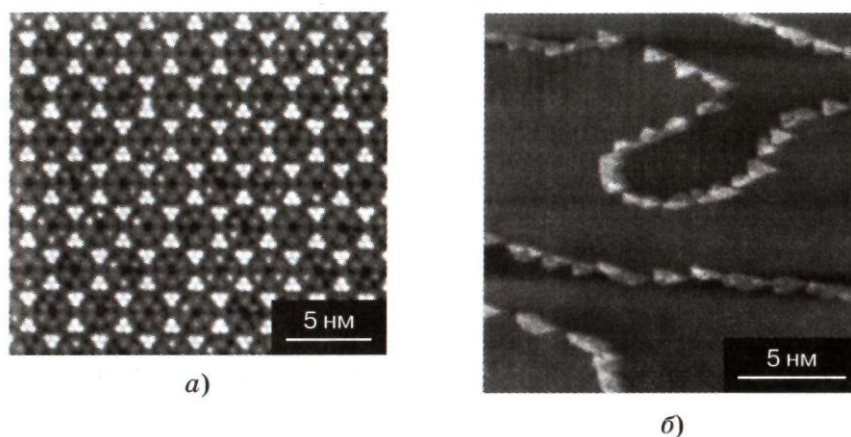


Рис. 6.6. Наноструктуры на поверхности кристалла кремния, образовавшиеся в результате самосборки: *а* — магические кластеры алюминия; *б* — нанопроволоки меди [11]

Электроника + фотоника + спинтроника

Фотоника и спинтроника имеют собственные пути развития в области информатики. Однако пока, видимо, будут использоваться сочетания устройств собственно нанoeлектроники с устройствами фотоники и спинтроники. Предполагается, что в недалеком будущем будет создан процессор на основе оптоэлектроники. Передача данных будет осуществляться фотонами со скоростью, недоступной электронам, что раз в 100 увеличит частоту и уменьшит тепловыделение. Однако для переключений в процессоре будут использоваться электронные схемы. Над компьютером такого типа работают известнейшие фирмы, такие как «IBM», «Hewlett-Packard», «Forbes ASAP» (подробнее можно прочитать об этом в статье [9]).

Использование нейронов

Необычным выглядит сочетание неорганических наноустройств с отдельными элементами живых организмов. Однако это естественно, если учесть, что в живых организмах многие процессы идут на наноуровне, и за миллионы лет эволюции они оптимизировались.

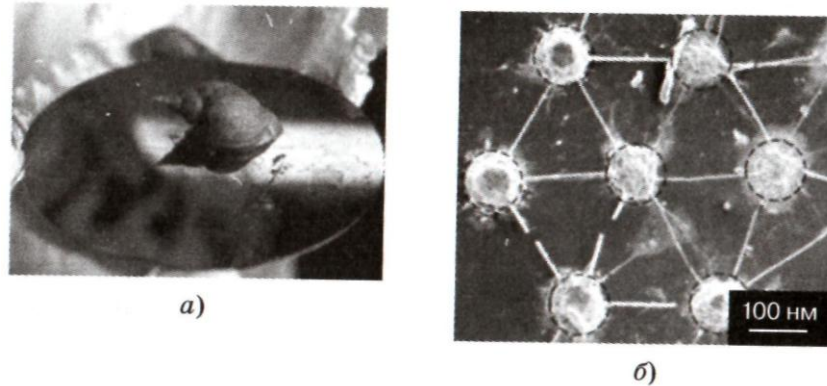


Рис. 6.7. *а* — улитка, нейроны которой объединены с кремниевым чипом; *б* — нейронная сеть из нервных клеток крыс, соединенных углеродными нанотрубками

На известной фотографии «улитка на чипе» (рис. 6.7, *а*) экспериментаторы Института Макса Планка (Германия) продемонстрировали возможность связи нейронов живого организма с элементами чипа. Один транзистор был соединен с другим через нейроны улитки.

На рисунке 6.8 миллиметровый чип, содержащий 16 384 транзистора и сотни конденсаторов, взаимодействует с генетически «подкорректированным» нейроном крысы. Связь двухсторонняя: когда ионы натрия перемещаются через клеточную мембрану нейрона, транзистор реагирует на изменение ее заряда; если же транзистор через конденсатор шлет ток нейрону, тот также реагирует на это влияние. Нейроны улиток и крыс модифицировали, увеличив в их оболочках число ионных каналов и повысив их активность. В свою очередь, чип покрыли теми белками, которые связывают нейроны в мозге.

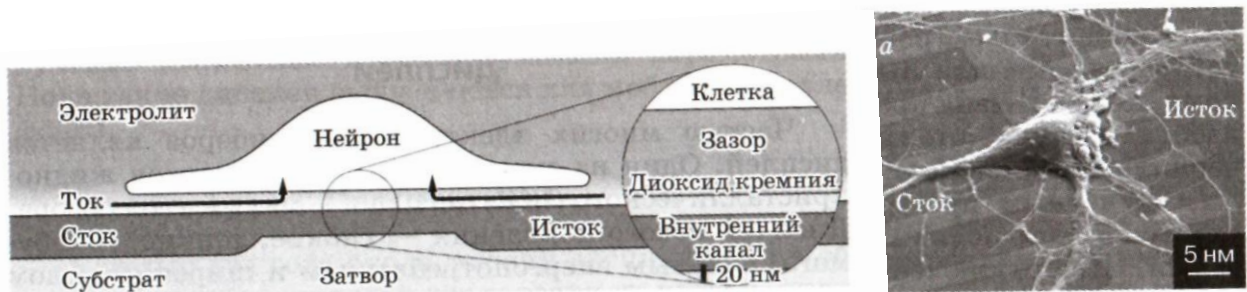


Рис. 6.8. Одиночный нейрон крысы на микросхеме [biochem.mpg.ru]

Подобная схема может стать основой искусственного мозга, основой чипов-протезов и чипов-имплантатов. На рисунке 6.7, *б* представлена фотография сети нейронов, соединенных углеродными нанотрубками. В процессе эксперимента нейроны собрались в кластеры из 20-100 клеток, осуществляя контакт через нанотрубки. Такая упорядоченная искусственная нейросеть может послужить основой биосенсоров, нейрочипов, в будущем – нейрокомпьютера. Система прожила 11 недель.

Дисплеи

Частью многих электронных приборов является дисплей. Один из существующих недостатков жидкокристаллического (ЖК) дисплея - малый угол обзора. Дисплеи нового поколения - гибкие, тонкие, как бумага, с малым энергопотреблением и широким углом обзора. Их можно свернуть и положить в карман, пришить на одежду. Этим требованиям удовлетворяет так называемая «электронная бумага», которая в ряде устройств заменила ЖК дисплеи. Известная японская компания «Citizen» представила в 2005 г. гибкие часы, изображение на которых формируется «электронными чернилами». Чернила содержат микрокапсулы с белым и черным пигментами, которые под влиянием электрического поля

изменяют цвет (черный - серый - белый). При отключении питания изображение сохраняется. Использование гибкого дисплея позволит, например, мгновенно «развернуть» мобильник в 12-дюймовый компьютерный экран (рис. 6.9).



Рис. 6.9. Телефон-компьютер

В 90-х гг. XX в. начались работы над цветными дисплеями на квантовых точках. Квантовые точки разных размеров светятся разным цветом. Дисплеи на квантовых точках имеют высокую яркость и контрастность, изображение на них видно даже при ярком солнечном освещении. Количество отображаемых цветов примерно на 30% больше, чем на экране обычного дисплея, а энергопотребление существенно меньше.

Снижение энергопотребления объясняется тем, что в дисплее на квантовых точках неработающие (не изменяющиеся в данный момент) пиксели не потребляют энергии. По функциональности новые дисплеи будут успешно конкурировать с ноутбуками. Основная технологическая проблема - получение квантовых точек с нужными параметрами. Пока такие дисплеи выпускаются для мобильных телефонов.

Перспективы

Каждые два года около тысячи специалистов в области полупроводниковой технологии из разных стран и фирм составляют так называемую «Международную маршрутную карту в области полупроводниковой технологии», в которой формулируются задачи и предполагаемые достижения на очередное двухлетие. В последние годы упор делается на **новой функциональности** нано- и микроэлектроники, например в области диагностики или совмещения устройств классической электроники с живыми нейронами. Мобильные телефоны к периоду **2015—2020** гг. благодаря развитию наноэлектроники будут создавать полную иллюзию полноценного общения, распознавая не только звуки, зрительные образы, но и запахи.

Отметим, что по производству компьютеров с **2006** г. на второе после США место вышел Азиатский регион, впервые обогнавший Европу. При этом Китай по объему производства практически сравнялся с Японией. Специалисты считают, что развитие информационных технологий, включая технологию передачи информации, - одно из самых важных достижений XX в. Важность информационных технологий сравнивают с появлением много веков назад книгопечатания [2]. Только в отличие от книгопечатания, внедрение новых технологий (в том числе персональных компьютеров) в быт, образование, науку, медицину произошло буквально за 10 лет.

В XXI в. наноэлектроника «подхватывает эстафету» у микроэлектроники. Полагают,

что если закон Мура будет продолжать действовать, то уже к **2020** г. мощность компьютеров достигнет обрабатывающей мощности человеческого мозга, а к **2050** г. компьютер по мощности будет конкурировать с суммарной обрабатывающей мощностью разума всего человечества.

Вопросы для самоконтроля

1. Чем наноэлектроника отличается от микроэлектроники?
2. Что такое молекулярный компьютер? Из каких элементов он состоит?
3. Какие задачи предполагается решать с помощью клеточных автоматов, квантового компьютера?
4. Как можно использовать углеродные нанотрубки в наноэлектронике?
5. Как используются в наноэлектронике зондовые технологии?
6. В чем заключаются преимущества наноэлектроники по сравнению с микроэлектроникой?
7. Какие основные проблемы возникают на пути массового производства изделий наноэлектроники?

Задания

1. Оформите конференцию по наноэлектронике с помощью учителей физики, химии и биологии.
2. Оформите стенд о разных типах памяти, используемых в микро- и наноэлектронике, и о перспективах использования биокомпьютеров, клеточных автоматов и квантовых компьютеров.
3. Подготовьте проект о сочетании неорганических устройств электроники с отдельными элементами живых организмов.
4. Подготовьте для учащихся младших классов доклад о компьютерах будущего.

Литература

1. *Алферов Ж. И.* Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии. Нобелевская лекция//УФН. 2002. № 9. Т. 172. С. 1068.
2. *Борисенко В. Е.* Наноэлектроника - основа информационных систем XXI века//СОЖ. 1997. № 5.
3. *Либенсон М. Н.* Фундаментальные исследования в области информационных и коммуникационных технологий//СОЖ. 2001. №9.
4. *Жувикин Г.* Физики шутят?//Компьютерра. 2000. № 35.
5. Нанокomпьютеры//Компьютерра. 2005. № 3.
6. Вся правда о молекулярных компьютерах / www.xakep.ru
7. <http://www.text.perst.ru>
8. *Шредер М.* Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. М.; Ижевск: R&C Dynamics, 2001.
9. *Кросби Кит.* Каким будет компьютер 2010 года www.futura.ru
10. *Валиев К. А., Кокин А. А.* От кванта к квантовым компьютерам//Природа. 2002. № 12. С. 28.
11. *Сарани А. А., Зотов А. В.* Самосборка наноструктур из атомов адсорбатов на поверхности полупроводниковых кристаллов//Российские нанотехнологии. Т. 2. 2007 № 5-6

Занятие 8.

Лекция: Наноматериалы

Определение понятия «наноматериалы»

Техническая культура общества во многом определяется используемыми материалами. Это нашло отражение в названиях «каменный век», «железный век», «бронзовый век». XXI век, скорее всего, можно назвать веком функциональных материалов и нанобиоструктур.

К наноматериалам можно отнести макроскопические материалы, если элементами их структуры являются нанообъекты, наноразмерные элементы.

Например, трековые мембраны (рис. 7.1) представляют собой макроскопическую полимерную пленку с микро или наноразмерными сквозными каналами (треками), пробитыми тяжелыми ионами на ускорителе. Такие пленки используют, прежде всего, как фильтры. Мировыми лидерами в этой области являются Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна), Институт кристаллографии РАН, Физикотехнический институт РАН.

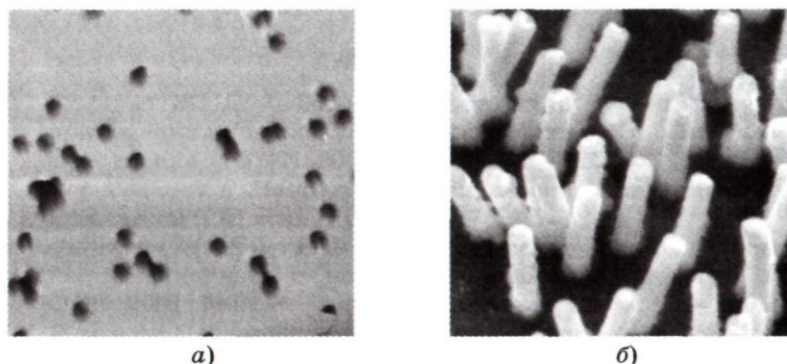


Рис. 7.1. *a* — трековая мембрана (АСМ);
б — микронные проволоочки (вторичные структуры)
(фотография лаборатории трековых мембран ИЯ РАН)

К наноматериалам относятся: ткань на основе нанотрубок, световоды на базе фотонных кристаллов, одномерная (1D) сверхрешетка из перемежающихся магнитных и полупроводниковых нанослоев и др.

До появления наноматериалов и осознанного выделения их в особый класс уже существовали и применялись разнообразные материалы с ультрадисперсными частицами и наночастицами. Получившая развитие в XVIII-XIX вв. фотография основывалась на образовании наночастиц серебра при разложении галогенида серебра под действием света. Ультрадисперсные порошки металлов, сплавов, оксидов и полупроводников, а также эти вещества в объемном состоянии, с зернами микронного размера, получили широкое применение. В промышленной химии успешно использовали катализ на малых частицах, которые для увеличения эффективности химической реакции помещались на твердый носитель с развитой поверхностью (например, микропористый цеолит). Многие полимеры образуют сложную структуру на микро и наноуровне. Переход от дисперсных и ультрадисперсных частиц, составляющих структуру материала, к наночастицам и классификация материалов по размерному признаку вполне закономерны.

Число разнообразных наноматериалов непрерывно увеличивается, отражая растущие

потребности современной техники. Мы рассмотрим некоторые из них, подчеркивая особенности применения и методов их получения.

Нанокристаллические материалы

Большой практический и теоретический интерес представляют собой компактные (консолидированные) микро и наноматериалы, к которым относят компакты, пленки и покрытия из металлов, сплавов и соединений. Их получают, к о м п а к т и р у я ультрадисперсные порошки, осаждая их на подложку. Особо выделяют следующие методы: интенсивной, под высоким давлением, пластической деформации, при которой «дробится» первоначальная структура, что приводит к радикальным изменениям свойств материала, и метод кристаллизации *аморфных сплавов*.

Получающееся твердое тело состоит из микро или нанокристаллов (рис. 7.2, а) с большой площадью суммарной поверхности раздела между ними. Нанокристаллы отличаются практическим отсутствием дефектов структуры и часто имеют другой объем кристаллической ячейки, чем макрокристалл. Нанокристаллический материал демонстрирует великолепное сочетание высокой прочности и пластичности.

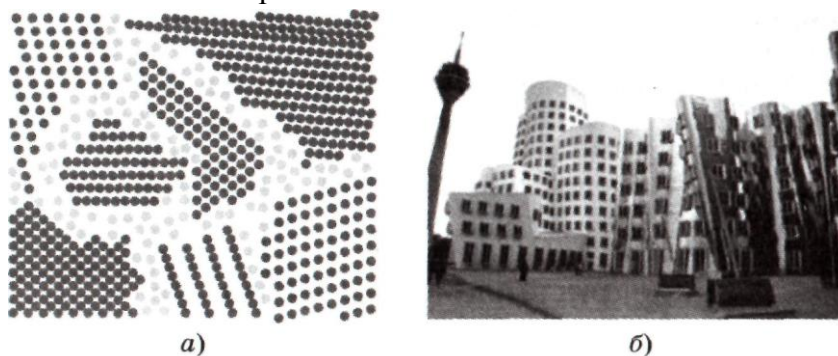


Рис. 7.2. а — схема структуры нанокристаллического материала;
б — комплекс домов архитектора Франка Овена Герри [11*]

Компактные наноматериалы по структуре и свойствам заполняют пробел между нанокластерами и классическими кристаллами. Их последовательное изучение началось с 1985 г., когда немецкий исследователь Г. Гляйтер предложил концепцию и практически реализовал способ получения нанокристаллических твердых тел. Прикладной интерес, как в случае всех наноструктур, связан с широкими возможностями размерного эффекта - изменения свойств при изменении размеров. Уменьшение размеров кристаллитов до 100 нм уже приводит к изменению свойств материала, а дальнейшее уменьшение до 10 нм дает еще более заметные эффекты.

А. И. Гусев [11*] сравнивает первоначальное восприятие структуры нанокристаллических материалов (непривычное по сравнению со структурой классических твердых тел) с первоначальным восприятием суперсовременных зданий (рис. 7.2, б), которые в дальнейшем оказываются не только удивительными, но и удобными.

Наиболее перспективными применениями нанокристаллических материалов считают их использование как конструкционных материалов, магнитных и функциональных материалов новых технологий. Нанокристаллические жаропрочные сплавы перспективны для изготовления лопаток нового поколения газовых турбин реактивных двигателей; керамические наноматериалы используются как в аэрокосмической технике, так и для изготовления протезов в ортопедии и стоматологии. Добавление в ракетное топливо нанокристал-

лического алюминия может ускорить процесс горения в 15 раз.

В военном бюджете США на 2008 г. предусмотрены исследования по наноструктурному титану и взрывоустойчивому нанокристаллическому цементу.

Композиты и нанокомпозиты

Далее речь пойдет о разнообразных нанокомпозитах, которые широко и успешно применяются в современной технике. Согласно классическому определению, композит - это неоднородный материал из двух и более компонент (составляющих), причем между компонентами существует практически четкая граница раздела [2]. Примером может служить известный многим стеклопластик, в котором стеклянные волокна включены в полимерную основу. Так как между атомами разных веществ существует взаимодействие, граница фактически состоит из тонкого переходного слоя. Часто можно выделить среди компонент так называемую матрицу, более или менее непрерывную среду, в которой находятся частички наполнителя. Наполнитель может иметь вид отдельных частичек, волокон, слоев. Слои или волокна могут быть определенным образом ориентированы или располагаться в матрице беспорядочно (рис. 7.3).

К композиционным материалам прибегают, если необходимо либо сочетание двух разных свойств материала, либо даже на первый взгляд противоположных свойств. Пример первого случая - композиционный материал из полимерной матрицы и малых частиц ферромагнетика. При достаточной концентрации наполнителя он проявляет ферромагнитные свойства, а за счет полимерной матрицы легко обрабатывается на станках. Пример второго - углепластик, основной материал современных скоростных самолетов и ракет, в котором сочетается высокая прочность хрупких углеродных волокон и ударостойкость достаточно прочной полимерной матрицы. В этом отношении конструкционные композиционные материалы идеологически повторяют строение внутреннего или внешнего (панцирь) скелета животных. Кости и панцири также сочетают в себе высокопрочную, но хрупкую составляющую (кристаллы минеральной природы) с непрочными, но гасящими ударные нагрузки биополимерами.

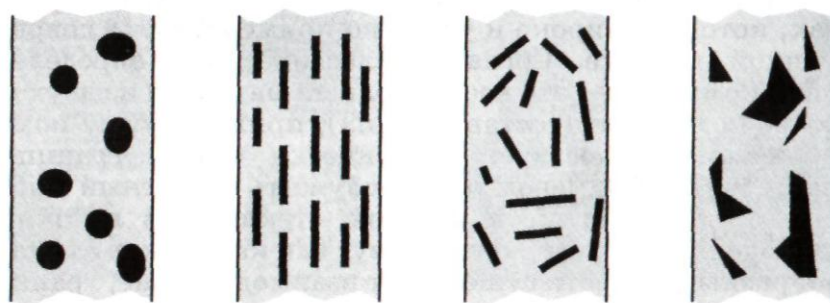


Рис. 7.3. Схемы различных типов композиционных материалов

Иногда композиционные материалы позволяют решить экономические или экологические проблемы, когда в качестве наполнителя используют либо отходы производства (древесная стружка, нитки), либо дешевый природный материал (глина).

В полимерных композитах экологические проблемы решаются, например, при использовании в качестве наполнителя вторичного сырья: измельченных старых автомобильных протекторов (работы Института синтетических полимерных материалов РАН), полимерных отходов кабельной промышленности и т. д.

Получить материал с дополняющими друг друга свойствами можно также при сочетании макроскопических слоев разных материалов. Так, в полиплексах - перемежающихся слоях неорганического стекла и полимера - прозрачность неорганического стекла необходима для остекления самолетов, автомашин. Полимерная прослойка гасит энергию удара, оберегая прочное, но хрупкое стекло.

Сочетание различных полезных свойств можно получить и в другом крайнем случае - варьируя структуру материала на молекулярном уровне. Например, в блоксополимере длинная макромолекула состоит из последовательностей (блоков) разных мономеров. Варьируя природу этих мономеров, можно получать разные по свойствам материалы и даже инициировать самосборку полимерных цепей в наноструктуры (рис. 7.4).

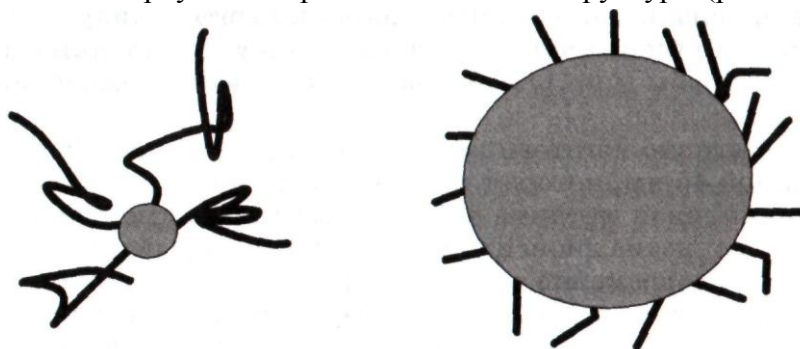


Рис. 7.4. Полимерные наноструктуры: звездообразный полимер, «волосатая наносфера»

Таким образом, нанокомпозит оказывается промежуточным звеном между этими «молекулярными» и классическими композитами. **В нанокомпозитах по крайней мере одна компонента имеет наноразмеры.**

Примером могут служить ферромагнитные наночастички, включенные в антиферромагнитную матрицу.

Однако для нанокомпозитов поверхность раздела (понятие макроскопическое) между компонентами выделить не всегда возможно в силу их малости. Но даже в случае определенности такой границы, например между наночастицами одного полимера и матрицей из другого, доля от общего объема и роль этой нанограницы (переходного слоя), имеющей иную структуру, чем объемная матрица, оказывается существенной.

Примером нанокомпозита могут служить дешевые композиты полимера с природной глиной, которые уже начали использовать, в том числе для изготовления бамперов японских автомобилей.

В последние годы разработчики автомобилей стремятся снизить их вес с целью экономии топлива и, соответственно, снижения выброса в атмосферу двуокиси углерода. Полимерные нанокомпозиты, армированные наночастицами, почти не уступают металлу по жесткости и прочности, а по звукопоглощению и стойкости к коррозии его превосходят. Разрабатываются специальные программы создания соответствующей дешевой технологии. Полимерные нанокомпозиты найдут массовое применение в строительстве (детали отделки зданий, трубы и пр.), мебельной и бытовой промышленности.



Рис. 7.5. Почти невесомая пленка наноскопической толщины [«Nature», 2006]

Недавно изготовили почти невидимую пленку толщиной 45 нм, которая тоже является нанокompозитом. Полимерная матрица нанокompозита (полимерная сетка) пронизана диоксидом циркония, который формируется одновременно с полимером и придает нанокompозиту прочность. Полимерная сетка обеспечивает пластичность и деформируемость пленки, которую можно протянуть через отверстие микропипетки, в 30 тыс. раз меньшее, чем сантиметровая ширина пленки (рис. 7.5).

В итоге пленка может удерживать жидкую среду в 70 тыс. раз тяжелее, чем она сама. Возможное применение - датчики, мембраны.

Композиционный материал, сочетающий нановолокна с наночастицами, планируют разработать для костюма солдата будущего.

Композиционным материалом является недавно созданная искусственная роговица - гидрогель, в котором содержание воды может достигать 80% (как в живых тканях). Трехмерная эластичная сетка хорошо выдерживает процедуру пришивания; живые клетки из окружающих тканей хорошо размножаются в ее порах и вырабатывают коллаген, склеивающий искусственную роговицу с глазным яблоком. Сегодня более 10 млн человек во всем мире слепы из-за различных повреждений роговицы, а при пересадке от донора примерно в 20% случаев роговица отторгается. Применение искусственной роговицы решит проблему - зрение восстанавливается почти сразу (при трансплантации донорской роговицы этот процесс занимает от полугода до года).

Разнообразие структуры полимеров определяет разнообразие структур наносистем полимер - металл.

Ионы металлов и *супрамолекулярные структуры* (рис. 7.6, а) объединяются в супрамолекулярные композиты.

Дендример с ветвящейся древовидной структурой может «захватывать» различные наночастицы (см. рис. 9.4.). На периодическом молекулярном рисунке поверхности некоторых полимеров наночастицы металла укладываются в соответствующий узор и после отжига образуют нанопроволоки.

Из полимерных нанокompозитов с наполнителями из наночастичек металлов, сплавов, полупроводников изготавливают электропроводящие пленочные материалы, оптические элементы, светофильтры. Один из существенных недостатков полимеров при их использовании в качестве конструкционных материалов - горючесть, часто с выделением ядовитых веществ. Введение в полимер наноразмерных порошков может привести к снижению его горючести вплоть до самозатухания огня.

Для решения сложных задач сочетают различные наноматериалы. Известная компания «DuPont» разработала новый материал для костюмов людей, работающих в экстремальных условиях (солдат, пожарных, спасателей и пр.). Этот материал, кроме слоев прочных и огнестойких нанотканей, содержит слой особой выборочно проницаемой наномембраны, которая является непроницаемой для отравляющих и биологически опасных веществ и вместе с тем позволяет влаге от пота уходить наружу, чтобы не допустить перегрева тела. Можно сказать, что нанокompозиты затем объединены в макрокомпозит (как в полиплексе). Новые костюмы на 50% легче обычных, мягче и к тому же «дышащие». Они проходят испытания в армии США.

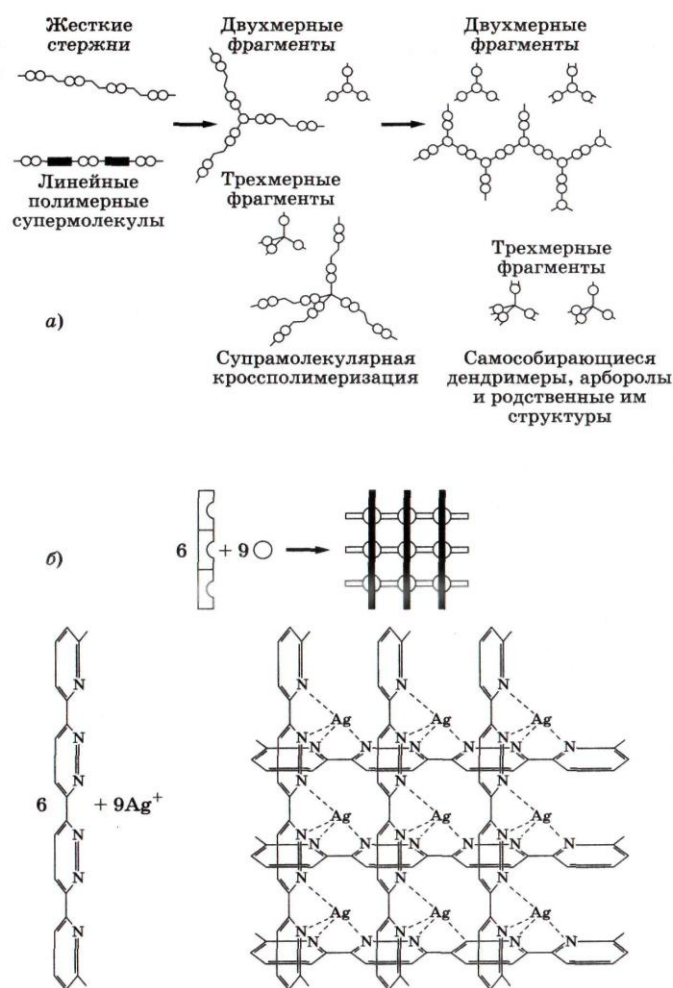


Рис. 7.6. а — типы супрамолекулярных структур;
 б — схема самосборки решетки из шести линейных молекул
 и девяти ионов серебра [2*]

Нанопористые материалы

Нанопористые материалы рассматриваются последнее время как новый класс функциональных материалов. Традиционно они используются как фильтры - катализаторы с развитой поверхностью, но, кроме того, в поры (особенно калиброванные по размеру) можно помещать самые разнообразные вещества, выполняющие различные функции. Трековые мембраны используются как фильтры для бактерий, плазмы крови и пр. (см. рис. 7.1, а).

Ведутся работы по созданию керамических нанопористых материалов в форме цилиндров. Они предназначены повысить эффективность технологии очистки нефти (в настоящее время почти 20% сырой нефти остается переработанной из-за плохой очистки).

Металлоорганические структуры - каркасы или «кристаллические губки» способны накапливать газы лучше остальных пористых материалов. Поэтому их можно использовать для удаления углекислого газа из заводских выбросов, в них можно эффективно накапливать топливо в виде водорода и метана.

Нанопленки и покрытия

Тонкие пленки и покрытия играют в современной технике все большую роль. Они применяются как прозрачные проводящие плоские экраны, антифрикционные покрытия в

подшипниках, в качестве регистрирующих, отражающих и буферных слоев дисков CD, DVD и магнитооптических носителей данных; используются в жестких магнитных дисках, а также в оптических и магнитных ленточных и дисковых накопителях. Благодаря определенным оптическим свойствам их используют в микрозеркалах видеопроекторов, в противоотражательных покрытиях для объективов.

Компания «Sharp» изготовила солнечную батарею в виде пленки толщиной от 1-3 мкм, а это тоньше ранее применяемых пленок примерно в сто раз. Пленка площадью в две визитные карточки весит всего 1 г и обладает мощностью 2,6 Вт (достаточно, чтобы обеспечить электропитанием велосипедный фонарь). Слойми солнечных батарей планируется покрывать мобильные телефоны, автомобили и даже специальную одежду.

В то время как в электронике ставится задача перехода от планарных (плоских) структур к трехмерным, в области наноматериалов наметилась тенденция к получению материалов с наномерной толщиной и даже толщиной в 1 атом.

Получена прозрачная ткань из нанотрубок толщиной в несколько десятков атомов, причем разработана технология производства кусков ткани большого размера. За счет сочетания высокой проводимости, гибкости и большой удельной прочности эта ткань перспективна для применения во многих областях - от солнечного паруса до светодиодов. Поскольку она хорошо поглощает микроволновые излучения и при этом нагревается, ее можно сваривать без шва, а также применять для обогрева автомобильных стекол.

Новый материал графен (см. рис. 4.9), открытый совместно английскими и российскими учеными во главе с А. Геймом в 2004 г., стал первым моноатомным по толщине материалом. Получившие его ученые считают, что речь идет о совершенно новом, фантастическом классе материалов толщиной в один атом, которые будут демонстрировать уникальные свойства и найдут широкое применение на Земле и в космосе. Важно, что разработан метод извлечения отдельных атомных плоскостей из различных кристаллов («микромеханическое расщепление»), и в зависимости от потребностей можно будет использовать тот или иной из них.

Методы получения наноматериалов

При получении наноматериалов используются классические технологии, процессы самоорганизации (самосборки) и *матричный синтез*. Примером самосборки является регулярный нанофильтр из молекул антрахинона меди, образующийся при температуре жидкого азота (рис. 7.7). Разработчики фильтра предлагают его использовать, в частности, для «дышащего» покрытия имплантатов.

В супрамолекулярных материалах за счет самосборки с участием ионов металлов могут получаться разнообразные трехмерные структуры (см. рис. 7.6, б).

Примером *матричного синтеза* является получение вторичных структур на базе трековых мембран. В результате процесса электролиза получают металлические микро и нанопроволоки, выросшие в отверстиях трековой мембраны (см. рис. 7.1, б). Эти вторичные структуры можно применять в нелинейной оптике, для создания больших локальных электрических полей при масс-спектрометрии и пр.

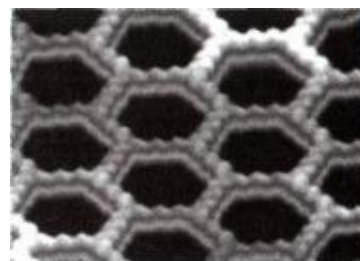


Рис. 7.7. Молекулы антрахинона, образовавшие на поверхности меди нанофильтр, каждая ячейка состоит примерно из 200 молекул [32*]

В качестве матриц используются также природные нанопористые структуры. Введенные в регулярно расположенные поры цеолита небольшие кластеры «гости» образуют периодическую решетку.

Гибридные наноматериалы

Весьма перспективными считаются **гибридные наноматериалы** - композиты на молекулярном уровне, состоящие из неорганических, органических и биологических компонентов. Среди последних выделяется ДНК. В последние годы возросло число работ, использующих комплементарность ДНК для построения сложных структур, в том числе трехмерных. Свободные концы ДНК, называемые в генной инженерии липкими концами, используют для наращивания и разветвления структуры. В полости таких структур можно ввести различных «гостей». Американские ученые создали регулярную структуру из наночастиц золота (размером 5 нм) с помощью ДНК-сетки. Промежуточным этапом было прикрепление к наночастицам золота коротких цепочек ДНК, которые расходились от частиц радиально, как у «волосатой наносферы» (см. рис. 7.4). ДНК-сетка содержала участки, комплементарные «волоскам». Ячейки получившейся структуры оказались размером 38 нм. Показательно, что природа снова проявила «своеволие»: исследователи ожидали, что наночастицы соберутся внутри ячеек, но, как показали результаты АСМ, они расположились в узлах сетки (рис. 7.8).

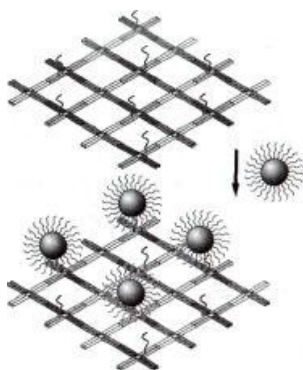


Рис. 7.8. Схема организации регулярной структуры из наночастиц золота с помощью сетки ДНК [3]

исследователь должен сделать только шаблон со стапелями и поместить его в раствор, а ДНК из раствора самоорганизуется, приклеиваясь комплементарными основаниями к стапелям. К ним можно добавлять различные кластеры, например использовать как матрицу для нанесения белков. Поперечные размеры оригами, подобные изображенному на рисунке, составляют 100 нм, что определяется максимальной длиной цепочки ДНК.

В Калифорнийском технологическом институте разработана технология получения сложных двухмерных структур из молекул ДНК. Авторы назвали их ДНК-оригами. Эффективной демонстрацией возможностей метода стали «смайлик» и развертка полушария Земли с картой США и Южной Америки (рис. 7.9). Форма будущего ДНК-оригами разбивается на ключевые участки, в которых короткие цепи ДНК, состоящие из нескольких нуклеотидов, соединяются с подложкой. Это своеобразный стапель (леса), на который затем укладываются длинные цепочки молекул ДНК, состоящий из 7000 нуклеотидов. Для смайлика было использовано 200 ключевых точек. Для карты пришлось выстроить леса двух уровней. При этом

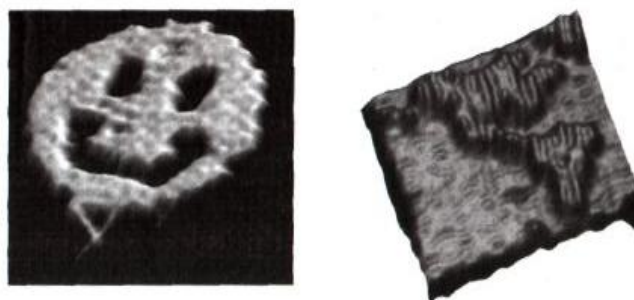


Рис. 7.9. ДНК-оригами (изображение в АСМ) [3]

Трехмерные конструкции из молекул ДНК после металлизации перспективны для использования в наноэлектронике.

Поставлена глобальная задача развития наряду с физическим материаловедением биологического материаловедения [4].

«Умные» материалы

Нанотехнология граничит не только с био и информационной технологией, но и с *когнитивными науками*. В ряде областей она ставит задачи создания «умных» устройств, а также «умных» материалов. «Умные», или «интеллектуальные», материалы должны эффективно и самостоятельно реагировать на изменение условий, смену режима работы устройства и непредвиденные обстоятельства.

Так, в Австралии специальная научно-промышленная организация разрабатывает «интеллектуальные» поверхности для самолетов и ракет. Они должны менять конфигурацию (при смене режима полета самолета), самовосстанавливаться при повреждениях, и все это при минимальном вмешательстве человека. Подобные самовосстанавливающиеся материалы разрабатываются для покрытий автомобилей, ракет, спутников.

Потребность в «умных» материалах вызвана тем, что современные механизмы и устройства становятся уязвимыми, с одной стороны, из-за своей сложности, с другой – из-за все более жестких условий эксплуатации: разные среды, радиация, большие скорости движения и пр.

Компьютерное моделирование давно используется для количественной оценки свойств различных материалов в разнообразных условиях эксплуатации. Для наноматериалов задачей компьютерного моделирования в основном становится прогнозирование новых свойств. По словам академика М. В. Алфимова, «осознается потенциал моделей прогнозировать свойства, которые лежат за пределами современного эксперимента» [5].

По прогнозу, из общего объема ежегодного рынка нанотехнологической продукции в 2015-2020 гг. (2 трлн долларов США) на новые материалы, которые не могут быть получены традиционными методами, придется 340 млрд долларов.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое нанокристаллические материалы и какова их структура? Где они используются?
2. Что такое композиты и нанокompозиты? Приведите примеры.
3. Приведите примеры получения материалов путем матричного синтеза.
4. Узнайте и напишите, какие композиционные материалы есть в вашей квартире.

Задания

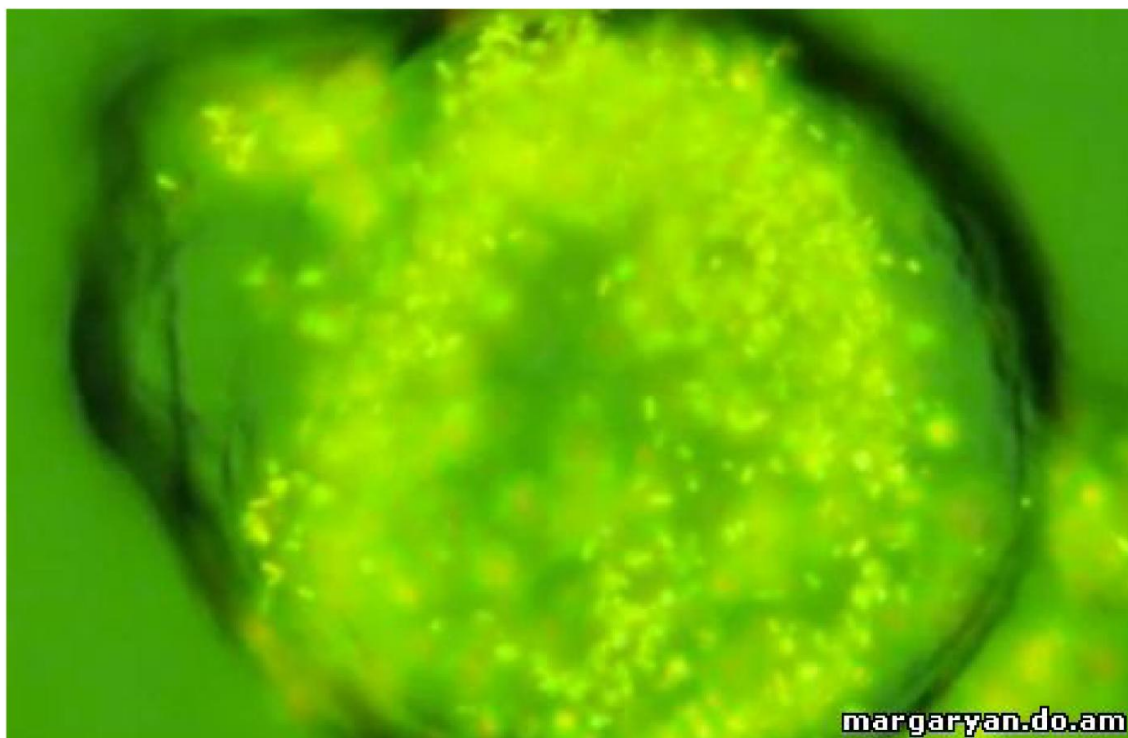
1. Подготовьте доклад о супрамолекулярных структурах и «умных» материалах.
2. Оформите стенд об использовании свойства комплементарности ДНК при получении наноструктур и о возможных путях применения таких наноструктур.

Литература

1. *Золотухин И. В.* Нанокристаллические металлические материалы//СОЖ. 1998. № 2.
2. *Кербер М.Л.* Композиционные материалы//СОЖ. 1999. №5.
3. *Свидиенко Ю.* Упорядочивание золотых наночастиц с помощью ДНК//<http://old.nanonewsnet.ru>
4. *Ковальчук М. В.* Органические наноматериалы, наноструктуры и нанодиагностика//Вестник РАН. Т. 73. 2003. № 5.
5. *Алфимов М. В.* Нанотехнологии. Роль компьютерного моделирования//Российские нанотехнологии. Т. 2. 2007. № 7-8. С. 1-2.

***Сборник интегрированных задач повышенного уровня
по курсу «Нанотехнологии. Когда размер имеет значение»***

Тайное становится явным.



В последнее время начали появляться статьи в лучших зарубежных (пока) журналах, которые связаны с исследованием процессов, происходящих в живых клетках без их разрушения, что впервые достигается за счет использования как современных оптических методов анализа (например, спектроскопии комбинационного рассеяния), так и наночастиц благородных металлов (золота, в основном), тем или иным образом захваченных клеткой и находящихся внутри нее (кстати, эти же наночастицы могут использоваться не только для диагностики, но и для лечения на клеточном уровне). К сожалению, при "погружении" наночастиц вглубь клетки оптический отклик часто практически исчезает, поэтому важно знать, как наночастицы "оседают" внутри клеток. Разумеется, это очень сложный процесс, поскольку клетка не есть капля чистой воды, окруженная оболочкой. Тем не менее, для простоты давайте рассмотрим именно такую упрощенную физическую модель. То есть предположим условно, что у нас есть живая клетка сферической формы диаметром 10 микрон, внутри которой находится наночастица золота.

Оцените размер этой наночастицы при условии, что она осаждается с постоянной скоростью с самого "верха" "на дно" клетки за 10 часов (6 баллов).

Примечание: учтите, что как только наночастица начнет оседать, на нее будет дополнительно к остальным силам действовать сила вязкого трения, определяемая формулой Стокса:

$$F_{\text{тр}} = -6\pi\eta rV,$$

здесь r – радиус наночастицы, V – скорость оседания наночастицы, а η – динамическая вязкость воды (равная 10^{-3} Па·с). Плотность золота – $19\,621$ кг/м³, а плотность воды V_w , конечно, помните сами.

Наночастица и пузырь

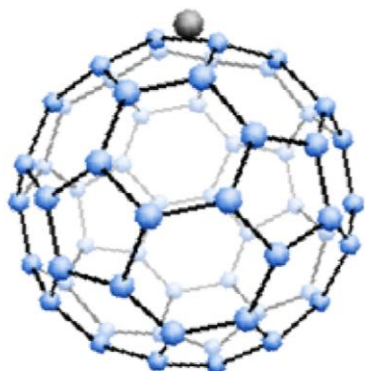


Гидрофобные или частично гидрофобные наночастицы не полностью смачиваются водой, поэтому рядом с ними может образовываться воздушный пузырь. Это явление гипотетически может быть использовано и на практике - при флотационном разделении частиц, для создания контрастов в ультразвуковой медицинской диагностике, при проведении синтеза наночастиц на границах раздела фаз и пр.

Оцените долю гидрофобной поверхности наночастицы кремния, достаточной для того, чтобы указанная система наночастица – пузырь могла сколь угодно долго плавать в воде. Радиус наночастицы r равен 100 нм. Удельная поверхностная энергия на границе кремний – воздух равна 40 Н/м² (8 баллов).

На всякий случай, плотность кремния равна 2330 кг/м³.

Маленький да удаленький



Гипотетически предположим, что на вершукше фуллерена радиусом 0,71 нм лежит тело очень малых, по сравнению с ним, размеров. От очень небольшого толчка тело приходит в движение.

Определить высоту относительно поверхности, на которой лежит сам фуллерен, на которой тело оторвется от поверхности фуллерена (3 балла).

Силой трения тела о поверхность фуллерена пренебречь.

Дополнительные 5 баллов можно получить, если объяснить, почему упрощенное решение задачи, предполагавшееся для геометрической модели выше, не имеет вообще никакого отношения к действительности с физической точки зрения.

Игра света

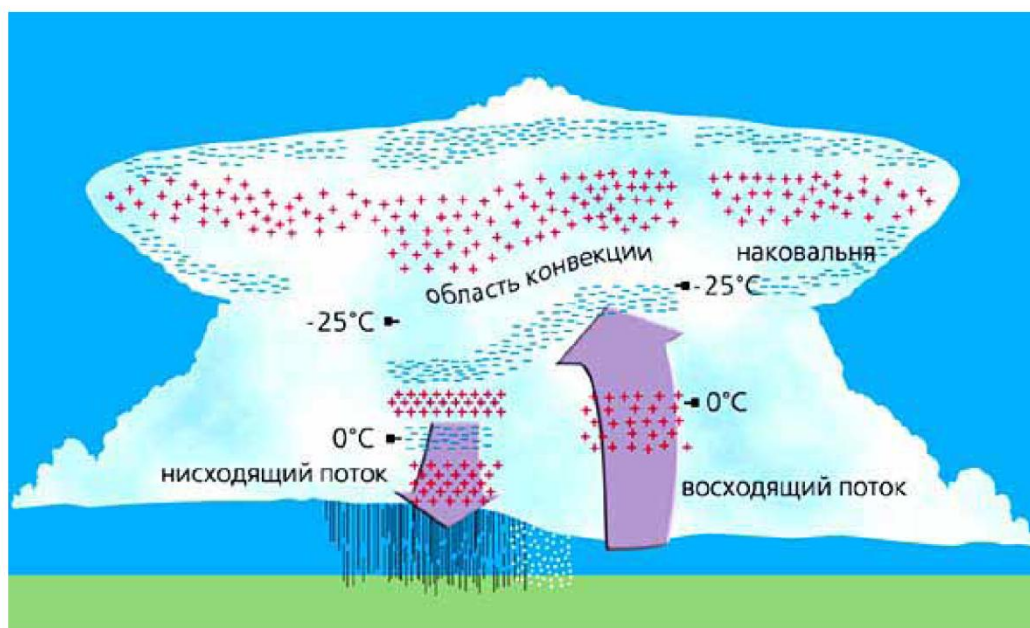


Одним из явлений, наблюдаемых в дисперсных системах, является опалесценция, как, например, происходит в известных всем лунных камнях. Рассеяние света наблюдается в том случае, когда длина волны больше размера частиц дисперсной фазы. Если длина световой волны много меньше диаметра частицы, происходит отражение света. Для расчетов обычно используют уравнение Релея, которое описывает зависимость между интенсивностью падающего (I_0) и рассеянного (I_p) света:

$$I_p = 24\pi^2 \left(\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 + 2n_2^2} \right)^2 \frac{vV^2}{\lambda^4} I_0$$

в этом уравнении n – показатели преломления, λ – длина волны падающего света.

1. Опалесценция определяется интенсивностью рассеянного света. Как изменится интенсивность опалесценции при увеличении длины волны света в 2 раза (1 балл)?
2. Какое явление будет наблюдаться под действием белого света при боковом освещении коллоидных систем и почему (2 балла)?
3. Какие из растворов (высокомолекулярные системы или металлические золи) обладают большей опалесценцией? Почему (3 балла)?



Сложная структура грозового облака согласно современным представлениям

Предположим, в грозовом облаке есть отдельная структура, возникшая из потока насыщенного водяным паром воздуха, восходящего вверх от теплой, комнатной температуры, поверхности моря и охладившегося затем до 0°C . Структура состоит из двух расположенных на расстоянии 10 метров друг над другом горизонтальных слоев, содержащих множество одинаковых во всех отношениях капелек диаметром 100 нм каждая. При этом и тот, и другой слой обладают площадью по 1 гектару. Слои заряжены одинаково по величине и противоположно по знаку вплоть до предельного напряжения пробоя воздуха 30 кВ/см.

Сколько капелек воды можно было бы поднять на высоту 200 метров за счет электрической энергии, запасенной в рассматриваемой структуре (3 балла)? Из какой массы воздуха эти капли выделились при охлаждении (6 баллов)? Какие законы, предложенные М.В.Ломоносовым, демонстрируются этой задачей, ответ поясните (1 балл).

Для справки: $\epsilon_0 = 8.8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. Плотность воды – 1 г/см^3 . Плотность воздуха при 25°C – 1.18 кг/м^3 , при 0°C – 1.29 кг/м^3 . Давление насыщенного пара воды при 25°C – 23.77 мм. рт. ст., а при 0°C – 4.585 мм. рт. ст. Остальные справочные величины, если необходимо, найдите сами. Изменением давления столба воздуха по высоте пренебречь. Диэлектрическую проницаемость воздуха считать равной аналогичной величине для вакуума.

Занятие 9.

Лекция: Ассемблер. МЭМС И НЭМС. Наномоторы

Основные составляющие наноробота

В своей книге «Орудия созидания» Э. Дреклер писал, что проблему «толстых пальцев» и возможность манипулировать материей на нанометровом уровне решат нанороботы, или, как их иногда называют, наноботы. Их пока нет, но уже во множестве работ получены отдельные составляющие будущих нанороботов. Особое место в создании таких устройств занимает компьютерное моделирование деталей наноробота.

Конкретный вид и конструкция наноробота зависят от его предназначения. На наноконвейере детали из атомов и молекул могут собирать достаточно простые «наноруки». Уже сконструирован «нанопинцет» из двух управляемых электрическим током углеродных нанотрубок, функция которого сводится к манипулированию с объектами в десятки и сотни нанометров. Наноробот, путешествующий по человеческому организму с целью его «ремонта», должен быть достаточно независим. Сеть нанороботов, проводящих экологический мониторинг некоторого района, должна быть самоорганизована. В общем случае наноробот должен состоять из следующих основных частей:

- наномотор (или наноактюатор) различной степени сложности;
- источник энергии;
- система обратной связи с оператором, возможно, с другими нанороботами;
- набор необходимых сенсоров;
- манипуляторы.

Ассемблер Э. Дреклера

Среди нанороботов особое место занимает классический молекулярный **ассемблер** (собиратель), идея которого предложена Э. Дреклером, наноробот, способный собирать различные структуры, в том числе другие молекулярные машины и их части. Дреклер полагал, что если не разработать систему самовоспроизводящихся нанороботов, невозможно будет создать макроскопические системы и продукты: это то же самое, что потребовать от одного - двух человек построить город. Поэтому в своих работах Дреклер использовал идеи фон Неймана о самовоспроизводящихся роботах.

Очевидно, что даже простейший ассемблер очень сложен и состоит из огромного числа атомов (много миллионов). Существует мнение, что его реальное воплощение потребует совместных интеллектуальных и финансовых усилий нескольких стран. Вместе с тем второй ассемблер ничего не будет стоить - его соберет первый. В американском центре космических исследований NASA, например, собираются решить задачу освоения Луны и Марса с помощью автономных устройств, способных к р е п л и к а ц и и .

В настоящее время работа над отдельными деталями ассемблера и их соединениями ведется методом компьютерного моделирования. На рисунке 8.1 приведены некоторые из таких разработок Э. Дреклера и Р. Меркля.



Рис. 8.1. Компьютерные модели элементов ассемблера [1]

Однако в последнее время Э. Дрекслер и К. Феникс выдвинули идею нанофабрик; по их мнению, практичнее и безопаснее использовать простые руки-манипуляторы нанороботов на больших производствах типа сборочных конвейеров (см. ниже).

МЭМС - микроэлектромеханические системы

Предшественники будущих **наноэлектромеханических систем, НЭМС (NEMS)**, уже существуют. Микротехнология создает удивительные **микроэлектромеханические системы - МЭМС (MEMS)**.

В 80е гг. XX в. на базе достижений полупроводниковой промышленности, в первую очередь на базе метода литографии, в ведущих научных и промышленных лабораториях начали разрабатывать реальные по технологии и стоимости микромеханические детали и изделия. Одним из первых достижений стали сенсоры ускорения, устанавливаемые в подушках безопасности автомобилей. Впервые они появились в 1993 г., сейчас автомобильные фирмы закупают их примерно на 50 млн долларов в год. Гироскопические наносенсоры осуществляют задачи навигации, наведения ракет на цель и пр. Недавно такой «процессорный гигант», как компания «Intel», публично заявила о стратегической важности МЭМС и своем интересе к ним. В последние годы объем мировых продаж МЭМС изделий составил 10% от продаж изделий «традиционной» электроники. Основные изделия МЭМС характеризуются минимальными размерами, минимальной стоимостью, надежностью в эксплуатации, низкой потребляемой энергией и массовостью производства.

Отдельные изделия МЭМС (различные микросенсоры, насосы, моторы) не видны невооруженным глазом. Компания «Sharp» изготовила солнечную батарею в виде пленки толщиной от 1 до 3 мкм. Ряд ведущих компаний сообщили о создании чипов, в которых будут совмещены антенны, фильтры и соответствующий логический блок. В качестве источников энергии микророботов могут использоваться разработанные электрические батареи размером 1 мкм, а известная фирма «Sandia» (США) разработала микромашинный процесс получения чипов такого же размера. Это позволило компании к 2000 г. построить модель автономного робота размером в несколько сантиметров. Робот - машинка с полимерным каркасом имела шесть колес и гусеничный ход, два электромотора, процессор емкостью памяти 8 Кб, датчик температуры, химический сенсор, видеокамеру, микрофон и три батарейки от часов. Именно размер батареек лимитировал размер миниробота. Важно, что изготовлен робот из коммерчески доступных компонентов. Планируется использовать его для поиска и обезвреживания мин, опасных биологических и химических веществ, разведки. Остается проблема - малая емкость батарей.

Американский миниатюрный самолет «Черная вдова» имеет вес 80 г, размах крыльев 15 см, высоту полета 230 м, время в полете 30 мин, дальность полета около 2 км, скорость 70 км/ч, КПД двигателя 82% . Самолет оснащен двумя видеокамерами (в оптическом и ИК диапазоне) весом по 2 г с радиусом передачи изображения 2 км.

В Массачусетском технологическом институте - одном из лидеров нанотехнологии - разрабатывается серия микророботов NanoWalkers («наноскоророды»). Основной принцип их применения - переход от конвейерного метода сборки деталей к «муравьиному», когда недорогие мобильные роботы - сборщики все вместе трудятся над неподвижной микродеталью (возможно - их будущим собратом). Роботы перемещаются на пьезокерамических ножках, которые могут удлиняться и укорачиваться, гнуться внутрь и наружу, в зависимости от электросигнала. Роботы делают около 18 тыс. шажков в секунду, причем

эти шажки могут быть от 2 нм до 50 мкм. При быстром темпе они бегают быстрее тараканов. Подзаряжаются роботы - сборщики на специальной поверхности с чередующимися полосами разного по знаку электрического напряжения. Связь с ними осуществляется через цифровую камеру и инфракрасную систему на верхушке корпуса робота. Основное - добиться точности в работе, поэтому скороходы оснащены не только манипуляторами для микронной сборки, но и сканирующими зондами.

В этом же институте разрабатывают модель микроробота - хирурга для внутрисосудистых и внутрисосудистых операций

Группа европейских ученых создала микроробота - искусственного таракана. Он даже пахнет как таракан, а главное - имитирует мельчайшие особенности «этикета» тараканьего сообщества. Поэтому микроробот был воспринят этим сообществом как «свой», хотя внешне это микрочастица на колесиках. Все тонкости поведения и специфику запаха ученым пришлось изучать в течение трех лет и имитировать у микроробота. Цель эксперимента - получить возможность руководства группой различных животных за счет искусственного лидера.

Задача создания микророботов упрощается, если они предназначены для стационарных работ и ими можно управлять с помощью проводной связи. Международная кооперация европейских ученых создала роботов для манипуляций клетками на предметных столиках оптических микроскопов и в вакуумных камерах СТМ. Их орудия труда - микропипетки, микрозажимы. Оператор щелкает указателем мышки по изображению на мониторе конкретной клетки, робот находит эту клетку, засасывает в микропипетку, переносит в нужное место и выпускает. В другом варианте два микроробота удерживают указанную клетку и впрыскивают в нее нужный реагент. Все операции занимают секунды.

«Умная пыль»

Министерство обороны США с помощью знаменитого университета в Беркли (Калифорния) запустило программу «Умная пыль», цель которой - создание объединения микро (в будущем - нано) устройств датчиков, достаточно автономных, способных общаться между собой и с центром управления. Множество таких «умных пылинок» может незаметно оседать на любой объект и передавать согласованную информацию в центр. Микродатчики «умной пыли» могут осуществлять непрерывный мониторинг окружающей среды, предсказывать приближающиеся катастрофы и террористические акты и, конечно, использоваться в военных целях. Сообщения от оператора меняют программу поведения микроробота. Система может быть «встроенной» (например, осуществлять мониторинг кровообращения и давления человека, мониторинг качества продуктов); может участвовать в слежении за миграцией птиц.



а)



б)



в)

Рис. 8.2. Варианты «умной пыли» [6]:
а — микролетательный аппарат;
б — микроэнтомоптер — «механический мотылек»;
в — подводный микроробот

Для системы учеными Беркли создана уникальная сверхминиатюрная микросхема-радиопередатчик, которая в 50 раз меньше чипа сотового телефона и потребляет в 1000 раз меньше энергии. Проблема энергопитания в этом и во многих других случаях является ключевой. В некоторых устройствах предусматриваются как солнечные батареи, так и резервные аккумуляторы. Необходимость бережного потребления энергии заставила использовать ряд оригинальных технологий, при которых сигнал пылинки в несколько сот микроватт требует мощности в несколько милливатт. Для запуска в производство «умной пыли» основана специальная компания «Dust Inc». На рисунке 8.2 приведены некоторые из разрабатываемых моделей «умной пыли» для воздуха и воды.

После того как по проекту были сделаны первые сообщения, во многих странах появились аналогичные проекты «умной пыли», в частности для автоматизации создания условий жизнедеятельности в офисе, жилом помещении и пр. Перспективным будет применение «умной пыли» в ближнем космосе: вывод в космос роя малых и сверхмалых спутников обойдется дешевле, чем одного большого, а потеря одного из членов роя из-за «космического мусора» или солнечной вспышки не приведет к нарушению работы роя в целом.

Наномоторы

При создании НЭМС, в частности наномоторов, исследователи в поисках вариантов, естественно, обратились к живой природе, где многие процессы идут на наноуровне и можно использовать уже имеющиеся компоненты биологических систем. К тому же эволюция привела к хорошим техническим характеристикам биологических моторов. Видимо, очень перспективными окажутся гибридные устройства, в которых будут сочетаться технические элементы с элементами живых систем. Использование методов *генной инженерии* и биотехнологии окажется при этом весьма полезным.

В частности, было предложено несколько вариантов наноактюаторов на основе ДНК. В одном из них к концу молекулы ДНК прикрепляется светоизлучающая органическая молекула, а к другому концу - светопоглощающая. Молекула ДНК, поочередно поглощая и излучая свет, то сворачивается, то разворачивается.

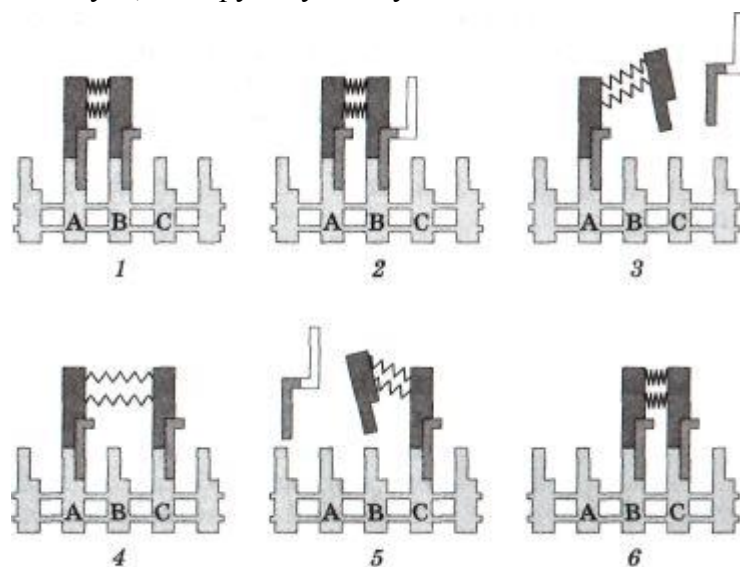


Рис. 8.3. Шагающий наноробот на основе ДНК [7]

В другом варианте использовали фрагменты ДНК с «липкими концами» и создали двуногий шагающий наноробот. Он шагает за счет того, что поочередно присоединяет и отсоединяет ноги, представляющие собой фрагменты ДНК, к основанию, тоже состоящему из ДНК. В растворе плавают миллионы таких нанороботов. Внешне робот похож на щипцы для конфет: две двухцепочечные ДНК ноги длиной около 10 нм, упруго соединенные сверху (рис. 8.3). Каждая нога состоит из 36 нуклеотидных пар с обычной последовательностью: аденин напротив тимина и гуанин напротив цитозина

на. Со свободных концов ног свисают совсем коротенькие одноцепочечные обрывки ДНК («липкие концы»). Робот ступает по особым опорам, тоже состоящим из ДНК, но не *комплементарным* кончикам ног. Поэтому без дополнительных обрывков ДНК - «якорей» он не держится на ногах. В начальный момент робот зафиксирован двумя одноцепочечными спиралью ДНК - «якорями», которые с одной стороны комплементарны окончаниям ног, а с другой - вершине опоры. Этому соответствует позиция 1 на рисунке 8.3. Затем свободно плавающая в растворе спираль ДНК, изображенная на рисунке белым элементом, вступает с правым якорем в химическую связь и «уводит» его. Незакрепленная нога зависает над следующей подставкой, где ее подхватывает очередной «якорь» (позиция 4). Затем эта ситуация повторяется с левой ногой, и робот делает полный шаг.

В начале эксперимента в растворе плавали только «щипцы» и опорные молекулы.

После добавления «якорей» роботы встали на ноги. После добавки «разъякоривающих» молекул нанороботы зашагали.

Заметим, что комплементарность цепей ДНК сейчас активно обыгрывается при составлении различных плоских и трехмерных искусственных конструкции, а также в медицинских приложениях нанотехнологии.

Было предложено использовать для сборки наномашин комплементарность белков, располагая их соответственно на деталях машин и на поверхность микроорганизмов.

Биологии известны белковые двигатели в живых клетках. Важно, что в качестве горючего эти наномоторы используют универсальное химическое топливо всего живого - *аденозинтрифосфорную кислоту* (АТФ). Природа энергии, необходимой наномотору, - отдельная проблема. Это может быть энергия лазерного излучения, солнечная энергия, переменное электрическое напряжение. Но, например, для наноробота, чистящего кровеносные сосуды от отложений холестерина, нужен автономный и постоянный источник питания, и естественно попытаться использовать АТФ.

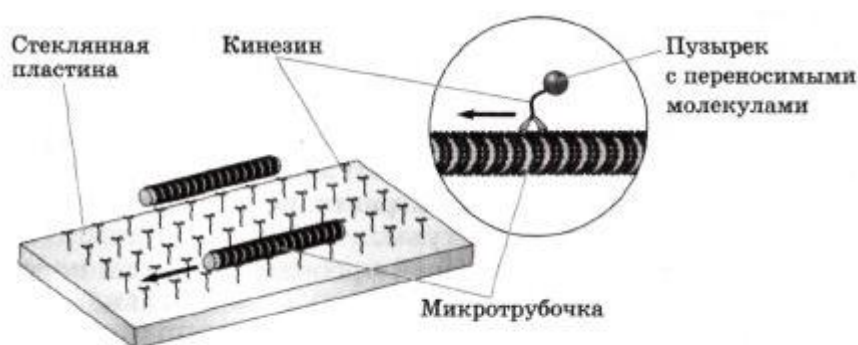


Рис. 8.4. Наноактюатор, основанный на кинезине [5].
Кинезин «шагает» по микротрубочке

В одной из транспортных систем живой клетки по трубочкам, сложенным из белка тубулина, бегают нанодвигатели, состоящие из белка кинезина, перевозя молекулы липидов и белков. Исследователи обратили этот процесс, заставив нанодвигатели, закрепленные на стекле, передавать друг другу трубочки, как лежащие на спине акробаты передают друг другу предметы ногами (рис. 8.4). Чтобы разместить нанодвигатели на поверхности стекла упорядоченными рядами, стекло предварительно обработали полимером тефлоном, и его длинные молекулы расположились подобно грядкам с бороздками. Затем капнули на стекло раствор с кинезиновыми белками, которые разместились в этих бороздках между грядками. Когда к ним добавили немного нанотрубочек, окрашенных флуоресцирующим

соединением, и каплю источника энергии - АТФ, то под микроскопом стало видно, как наномоторчики передают друг другу по прямой нанотрубочки. Считается, что подобные системы могут стать основой контейнеров для сборочных линий наноустройств. Удалось измерить силу тяги одной молекулы кинезина - 5-6 пкН, что примерно равно силе давления света лазерной указки. Но в наномасштабе такое значение силы является достаточно ощутимым. В другом случае двигатель был создан непосредственно на биологическом наномоторе, связанном с синтезом АТФ. АТФаза - это универсальный фермент, существующий практически в любом живом организме, сложный комплекс из нескольких белков, имеющий вид столбика диаметром и высотой около 12 нм (рис. 8.5, а). По мере того как через часть АТФазы протекают протоны, возникает вращение ее центральной части вокруг оси и идет синтез АТФ. Если же на этот моторчик подавать АТФ, процесс идет в обратную сторону: совершается гидролиз АТФ и моторчик вращается (в обратную сторону). Исследователи методами геной инженерии внесли два изменения в белки АТФазы. Одно изменение позволило прикрепить нанодвигатели к наностросткам из никеля, напыленным на стекло: цилиндрики встали на них вертикально. За счет другого изменения приклеили пластмассовые шарики к верхнему концу центральной оси биомоторчиков. Капнув раствор с АТФ, исследователи наблюдали под микроскопом вращение шариков (рис. 8.5, б), которое продолжалось более двух часов.

В другом аналогичном исследовании был оценен коэффициент полезного действия такого наномотора. Он оказался близок к 100%, т. е. существенно выше, чем для всех изобретенных человеком двигателей. «Если бы этот двигатель был ростом с человека, - писали исследователи, - он мог бы вращать деревянный столб длиной около 2 км с частотой 1 с^{-1} ».

Часть исследователей заинтересована в использовании в качестве актюаторов для наноробототехники бактериальных жгутиковых моторов.

Некоторые виды бактерий плавают со скоростью больше 10 мкм/с, а частота вращения жгутиков может превышать 1000 с^{-1} . При этом биомоторы бактерий очень экономичны.

С точки зрения источника энергии перспективен недавно полученный микроробот размером в половину диаметра человеческого волоса, в котором используется культура мышечной ткани в питательной среде из глюкозы. Робот состоит из кремниевой дуги, к нижней стороне которой прикреплены слои сердечных мышц из сердца крысы, выращенные в чашке Петри с глюкозой. Пока мышцы наращивались, дуга была закреплена, затем

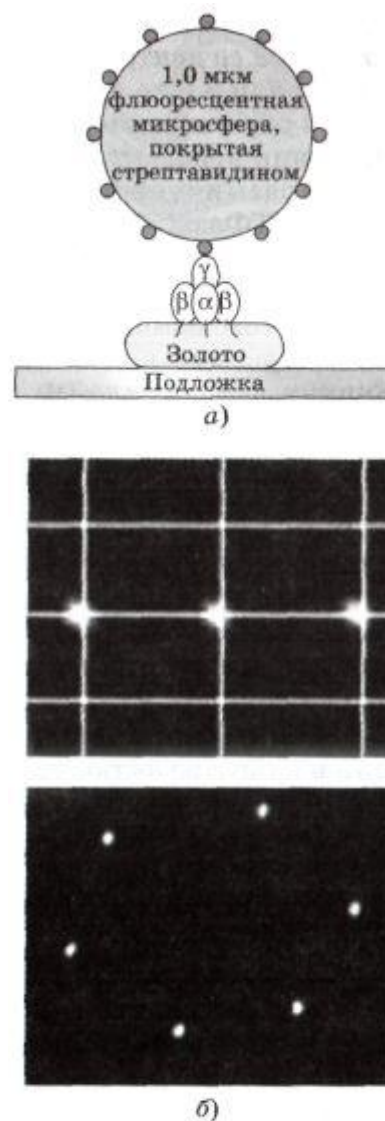


Рис. 8.5. а — наномотор на основе АТФ; б — кадровая съемка флуоресцентной микросферы позволяет заметить вращение [nts.nm.ru]

ее освободили, и «мышкулобот» начал ползать со скоростью до 40 мкм/с. Сокращения мышц сгибают дугу, делая ее то уже, то шире, это вызывает движение робота (рис. 8.6). Использование в МЭМС и НЭМС живых мышц решает некоторые медицинские задачи и задачи обслуживания космических кораблей, в том числе оперативный ремонт их обшивки. Исследования «мышкулоботов» активно финансируются NASA.

Существует целый ряд проектов нанодвигателей, основанных на различных физических эффектах. Проекты создаются с помощью компьютерного моделирования, учитывающего результаты некоторых предварительных экспериментов. Так были проведены опыты по вращению нанометровых стеклянных стерженьков в вязкой среде под действием луча лазера, а затем рассчитана общая модель такого мотора. Частота вращения оказалась порядка 1 ГГц. Рассчитан наномотор из двух концентрических наноцилиндров, один внутри другого, один служит ротором, другой - статором. Как источник энергии используется лазер.

Оригинальный проект предложен в 2000 г. израильскими физиками. Три наночастицы лежат на поверхности, связи между ними условно изображены пружинками (рис. 8.7). Пусть длина во времени, причем между колебаниями первой и второй пружинки периодически изменяется сдвиг по фазе. Тогда система в целом начнет двигаться аналогично движению червяка. На рисунке 8.7 изображены последовательные стадии такого движения. Система может двигаться не только по горизонтальной, но и по вертикальной плоскости и тащить некоторый груз. Если

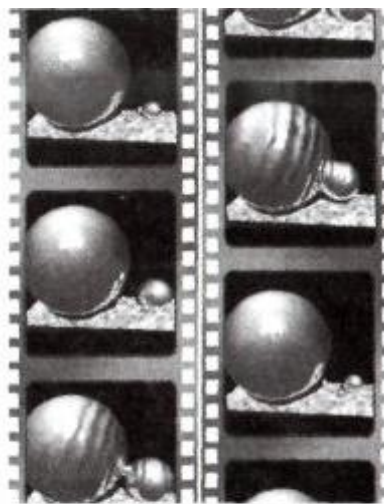


Рис. 8.8. Кадры движения капель металла диаметром 1—10 нм по нанотрубке, находящейся под напряжением [39*]

три частицы объединить в кольцо - получится нанометровый ротор. В качестве пружинки могут ступать, например, *фотохромные молекулы*. Заметим, что такой двигатель может быть применим и в макрварианте, так что развитие нанотехнологий дало неожиданный вклад в макроскопическую механику.

Аналогичный наномотор предложен для плавающего наноробота (например, в человеческом теле

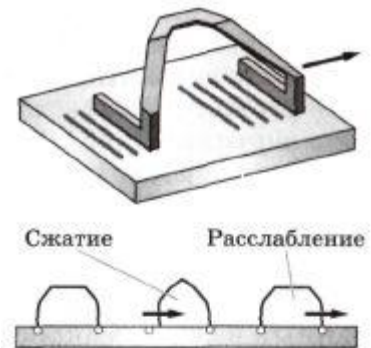


Рис. 8.6. «Мыскулобот» [5]

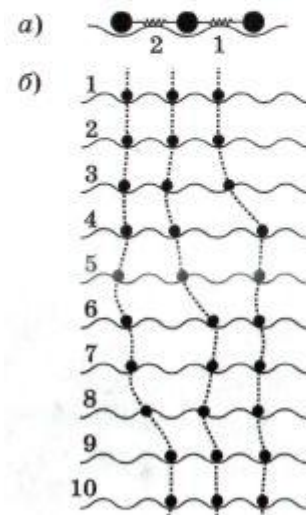


Рис. 8.7. Проект нанодвигателя, передвигающегося по принципу «червяка»: а — схема нанодвигателя, б — последовательные стадии движения [5]

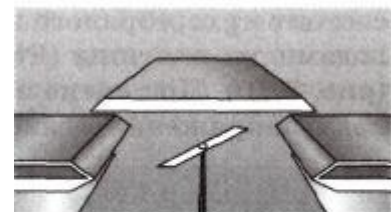


Рис. 8.9. Первый электромеханический наномотор [35*]

ле с целью доставки нужного лекарства в определенные его участки).

Создан своеобразный конвейер по перемещению атомов металла вдоль углеродной нанотрубки, к которой приложено слабое электрическое напряжение (рис. 8.8). Это более простой способ перемещения атомов, чем с помощью АСМ.

Проблемой во всех случаях является *броуновское движение*, в котором участвует такая маленькая система, как наномотор. Поэтому воздействие источника энергии должно существенно превышать эффект от броуновского движения. В частности, был предложен наномотор, где две углеродные нанотрубки являются статором, а наночастица (в опыте молекула ДНК) - ротором. Наночастица вращается между нанотрубками в зазоре шириной около 10 нм под действием переменного электрического поля с амплитудой напряжения 1 В. Большое для наномира значение напряженности электрического поля нивелирует эффект броуновского движения.

Недостатком нанороботов с биологическими деталями является их уязвимость к внешним воздействиям, прежде всего к температуре. Поэтому в одних ситуациях окажутся предпочтительней биомоторы, а в других - например, при очень низких или очень высоких температурах, вакууме, излучении - электромеханические наномоторы.

Был создан чисто электромеханический наномотор (рис. 8.9) с общим диаметром около 400 нм. Сто миллионов таких приборов можно поместить на булавочном острие. *Ротор* толщиной 5-10 нм выполнен из золота и закреплен на многослойной нанотрубке. Статоры тоже выполнены из золота и закреплены на кремниевой подложке. И ротор и электроды статора были нанесены на кремний с помощью электроннолучевой литографии, затем под ротором слой кремния удален. По данным электронной микроскопии частота вращения наномотора при переменном напряжении на электроде не менее 30 с^{-1} .

Существует еще ряд проектов нанодвигателей [1].

В разных наномоторах, как и в макроскопических механизмах, реализуется поступательное, вращательное или колебательное движение.

Нанопереклюатели

В некоторых случаях в наноустройствах и нанодвигателях необходим нанопереклюатель. В одной из работ в качестве переключателя предложена молекула, которая поднимает одну из «ножек» под влиянием щупа АСМ. Японские ученые разработали атомный переключатель, выгодно отличающийся своей простотой и надежной методикой изготовления. Переключатель состоит из серебряного наномостика между двумя проводниками из платины (Pt) и сернистого серебра (Ag_2S) (рис. 8.10). При смене полярности подаваемого на провода напряжения резко меняется проводимость. Это обусловлено тем, что серебряный мостик вырастает на Ag_2S в случае положительного потенциала на нем, а при смене полярности (положительный потенциал имеет Pt) исчезает. Переключатель может работать на частотах вплоть до 1 ГГц.

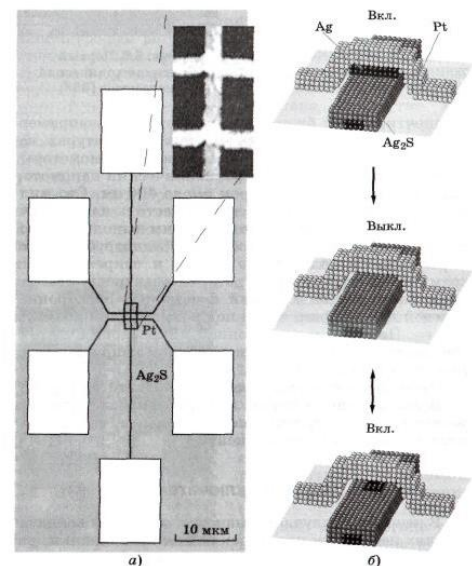


Рис. 8.10. Атомный переключатель, основанный на обратимом формировании и удалении серебряного мостика: а — изображение, полученное на СТМ; б — схема работы устройства [scientific.ru]

Угроза «серой слизи». Идея нанофабрик

Как любое достижение науки, принципиально меняющее технику и быт людей, создание нанороботов, способных к самовоспроизводству, вызвало тревогу, и тревогу обоснованную. Угроза «серой слизи» («grey goo» - термин, введенный Дрекслером), т. е. неконтролируемых нанороботов, разлагающих все окружающее на атомы исключительно для самовоспроизводства, вызывает опасение у ряда ученых. Любая совершенная технология, как показала практика человечества, может быть использована и на благо, и во вред. В 1989 г. Дрекслер основал в Калифорнии некоммерческий Предусмотрительный институт (Foresight Institute), который и возглавляет в настоящее время. Задача института - сформулировать и довести как до ученых, работающих в области нанотехнологии, так и до общественности систему правил, обеспечивающих безопасность в этой новой нанотехнической области, остановить развитие которой невозможно. Например, требуется, чтобы репликаторы не могли воспроизводиться в естественной, неконтролируемой окружающей среде, а только в специально подготовленной, должны использоваться коды выявления случайных «мутаций» и т. п. Ситуация напоминает формулировку знаменитых «законов робототехники» А. Азимова для макроскопических роботов.

Специалисты утверждают, что промышленные модели нанороботов, собирающих материалы и механизмы из отдельных атомов или наноразмерных «полуфабрикатов», появятся в ближайшие 10-20 лет. Скептицизм, который сопровождал появление первых книг и статей Дрекслера, не может устоять против реальных достижений нанотехнологии. Вместе с тем продолжается естественный процесс уточнения типа нанороботов, которые будут реально использоваться в ближайшем будущем. В своей книге «Наносистемы» (1992)



Рис. 8.11. Самый маленький в мире автомобиль
[science.compulenta.ru]

Дрекслер предложил другую систему организации работы нанороботов. Вместе с К. Фениксом он показал, что выгоднее не молекулярное производство, основанное на большом количестве мобильных нанороботов, а нанофабрика - комплекс жестко зафиксированных нанороботов (фабрикаторов), объединенных в производственную систему. При этом снимается угроза неконтролируемой репликации. Каждый фабрикатор будет производить наноблок размером $200 \times 200 \times 200$ нм, содержащий все необходимые части: нанокomпьютер, наноконвейер, наноманипуляторы сборки более крупных узлов и пр. Затем эти блоки начнут

объединяться, пока не будет создана нанофабрика.

Завершим эту главу СТМ фотографией самого маленького в мире автомобиля, размеры которого составляют одну десятитысячную диаметра человеческого волоса (рис. 8.11). Автомобиль состоит из «шасси» и четырех колесфуллеренов C_{60} , которые именно катятся (а не скользят) по золотой подложке при $200^\circ C$.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое ассемблер и дессемблер? Из каких основных частей в общем случае должен состоять наноробот?
2. В чем преимущество ассемблера для синтеза наноструктур по сравнению со сборкой при помощи АСМ? В чем заключается основное достоинство нанофабрик?

3. Почему при создании наномоторов часто обращаются к конкретным механизмам в живом организме или к их аналогам?
4. Почему в ряде случаев в качестве топлива желательное использование АТФ?
5. В каких нанодвигателях реализуется поступательное движение и в каких - вращательное?
6. Какие физические эффекты используются в различных нанодвигателях?
7. Каковы перспективы применения нанороботов в медицине?

Задания

1. Подготовьте подробное сообщение о наноактюаторах, в которых используется комплементарность ДНК.
2. Оформите стенд с рисунками и подробным текстом о работе различных наномоторов.
3. Сделайте доклад о существующих достижениях по разработке МЭМС.
4. Подготовьте для младших классов показ минифильмов о МЭМС и НЭМС.
5. Подготовьте и проведите диспут между двумя командами о положительных перспективах и опасностях, связанных с массовым производством нанороботов.

Литература

1. Web sites of the Foresight Institute and the Institute for Molecular Manufacturing. www.foresight.org/NanoRev/Images.html, www.zyvex.com/nano/, [http://www.imm.org/Parts/Parts 1. html](http://www.imm.org/Parts/Parts%201.html)
2. Берд К. Микроботы: технология будущего сегодня // Компьютерра. 2002. № 14.
3. Свидиенко Ю. Нанотехнологии сегодня // Компьютерра. 2002. № 25.
4. Баскин И. Компьютерное моделирование в молекулярной нанотехнологии // Компьютерра. 2002. № 41.
5. Свидиенко Ю. Систематический обзор существующих проектов наноактюаторов. <http://www.microbot.ru.02.12.2003>
6. Князьков М. Микромеханика. Всеобщая чувствительная сеть - «Умная пыль», <http://www.issp.ras>
7. Левин А. Шагающий наноробот. <http://grani.ru>. 07.05.2004

Тест для проведения промежуточного контроля

Что такое НАНО?

(Данный тест НЕ относится к зачетным и его можно проходить столько раз, сколько хочется...)

Все говорят "Нано", "нано"... А чему равна эта величина арифметически? С чем ее можно сопоставить? От какого слова она произошла? Кто придумал это модный термин? Простейшие вопросы о приставке "нано"... Вспомните, подумайте, ответьте, попытайтесь еще раз, если не получилось...

1. Кто считается крестным отцом нанотехнологий?

- Отец Джорджа Буша, организовавшего американскую национальную нанотехнологическую инициативу
- Л.Б.Меламед, ставший первым генеральным директором государственной корпорации нанотехнологий
- А.Б.Чубайс, который успешно провел Международный форум по нанотехнологиям
- Эрик Дрекслер, впервые придумавший обезумевшие орды нанороботов
- Ричард Фейнман, который призвал занять место внизу, где его еще много
- Астронавт Армстронг, привезший лунную пыль на Землю
- В.В.Путин, провозгласивший российскую национальную нанотехнологическую программу
- академик Ж.И.Алферов, лауреат Нобелевской премии
- академик В.А.Садовничий, Ректор МГУ

2. Один нанометр равен чему? Укажите арифметически правильный ответ...

- Одна миллионная сантиметра
- Одна миллионная миллиметра
- Одна тысячная ангстрема
- Одна триллионная мили
- Сто ангстрем
- Десять пикометров
- Одна миллиардная парсека
- Одна сотысячная дюйма
- Одна тысячная фута
- Одна миллиардная морского узла

3. Какой из размеров ближе всего к 1 нанометру

- диаметр молекулы фуллерена
- ванн-дер-ваальсовый радиус молекулы кислорода

- длина молекулы ДНК
- диаметр кишечной палочки
- толщина лапы муравья
- длина волны излучения бытовой микроволновой печи
- радиус квантовой точки на основе халькогенида кадмия

4. Из какого языка произошла приставка "нано" и что она означает?

- из древнеславянского и означает "солнечная пылинка"
- из тюркского и означает "жадный"
- из немецкого и означает "крошка"
- из греческого и означает "гном, карлик"
- из латыни и означает "глубина, топь"
- из английского и означает "мера, деление"
- из французского и означает "утренний ежик"
- из санскрита и означает "дитя, ребенок"
- из иврита и означает "богатый"

5. Какие из эффектов НЕ характерны для нанобъектов? Выберите наиболее подходящий ответ...

- Туннелирование
- Квантование (квантоворазмерные эффекты)
- Повышенная химическая активность
- Повышенная концентрация (точечных и протяженных) дефектов
- Повышенная концентрация "оборванных" связей
- Свечение (люминесценция) в видимой области
- Притяжение к постоянному магниту

6. Какой из перечисленных ниже объектов точно НЕ относятся к наномиру?

- углеродные нанотрубки
- наноалмазы
- квантовые точки
- кассиев пурпур
- платиновая чернь
- мицеллы
- вирусы
- ацетилен

- липосомы
- золь

7. Демон Максвелла, сортирующий молекулы, что может привести к передаче тепла от холодного к горячему, невозможен потому, что...

- ... он слишком маленький
- ... он нарушает законы природы
- ... молекулы очень быстрые
- ... молекул очень много
- ... я его видел!
- ... у него нет точки опоры
- ... откуда он возьмет энергию для совершения такой работы?
- ... беспорядок нельзя нарушить никогда

8. Назовите единственный (среди перечисленных) реально существующий в наномире тип объектов.

- Нанороботы
- Янусы
- Суперпарамагнитные монополи
- Супрамолекулярный вечный двигатель второго рода
- Гномы
- Единорог
- Флогистон
- суперструны

9. Кто предложил термин "серая слизь" для взбесившихся орд нанороботов?

- Ж.И.Алферов
- Р.Фейнман
- Р.Бредбери
- Э.Дрекслер
- Б.Клинтон
- И.В.Мичурин
- этот термин не существует, как и нанороботы
- никто не изобретал, это народная молва
- это термин IUPAC

10. В какое время появились термины «Наноматериалы» и «Нанотехнологии»?

- Они были еще со времен алхимиков
- В середине XX века
- В конце XX века
- В начале XXI века
- Их своими опытами фактически ввел М.В.Ломоносов

11. Кто предложил использовать «координату дисперсности» в описании и интерпретации корреляционных зависимостей между составом, структурой и свойствами веществ и материалов

- академик И.В.Тананаев
- академик П.А.Ребиндер
- академик Ж.И.Алферов
- гендиректор РОСНАНО А.Б.Чубайс
- академик В.А.Каргин
- президент РФ Д.А.Медведев
- Эрик Дрекслер
- Ричард Фейнман
- Михайло Ломоносов



Занятие 10.

Лекция: Нанотехнология и медицина

Нано и биотехнология

Медицина с самого начала развития нанотехнологии рассматривалась как одна из основных сфер ее приложения.

Основу биологических систем составляют структуры, имеющие наноразмеры. Можно сказать, что природа давно освоила нанотехнологию. Поэтому естественным является стремление использовать в медицинских целях искусственные наноструктуры. При этом, как было показано в предыдущих главах, есть смысл сочетать искусственные структуры с частями живых клеток.

Таким образом, достижения и перспективы нанотехнологии в области медицины часто граничат с *биотехнологией* или фактически представляют собой биотехнологию.

Особенностью биологических наноструктур является *комплементарность*, способность к распознаванию на молекулярном уровне (ДНК, антитела и др.). Эта способность является основой работы *биодатчиков*, но она же может быть использована для самосборки наноструктур, что является ключевым моментом в процессах «снизу вверх».

Основные области применения нанотехнологии в медицине

Основные области применения нанотехнологии в медицине в настоящее время:

- биодатчики, в том числе в живом организме;
- полноценные *имплантаты*;
- доставка лекарств в живой организм «по адресу»;
- диагностика (особенно раковых опухолей);
- дистанционная хирургия;
- разработка новых наноматериалов и лекарств;
- модернизация диагностических приборов и методов.

Медицина (в том числе космическая) и экология требуют создания микро и нанороботов, осуществляющих длительный мониторинг состояния живого организма и воздействия на него различных неблагоприятных факторов (например, радиации, что является актуальной проблемой для космонавтов). Особо стоят задачи генетического контроля продуктов питания и обнаружения биологического оружия.

Биодатчики (биосенсоры)

Принцип работы биодатчика изображен на рисунке 9.1. В качестве вещества, осуществляющего молекулярное распознавание, используются антитела, ДНК, ферменты и некоторые сложные химические соединения. Основной проблемой является быстрая потеря

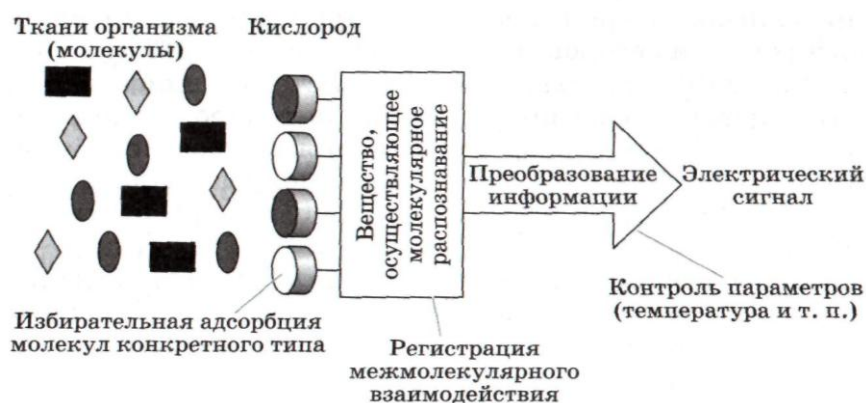


Рис. 9.1. Принципиальная схема биодатчика [3]

способности биодатчиков к молекулярному распознаванию, сейчас химики успешно продвигаются по пути синтеза «долгоиграющих» молекул. Для увеличения стабильности ферментов на биосенсорах их включают в полимерные или гелевые пленки или же связывают с подложкой ковалентными связями, чем достигается их многократное использование.

Широко используемым практическим достижением микро и нанотехнологии являются «лаборатории на чипе», проводящие экспресс-анализ ДНК и других биомолекул. Такое аналитическое микроустройство на кремниевом или стеклянном чипе потребовало разработки новых методик обработки и передачи информации, а также новых источников питания. На поверхность чипа или наночастиц можно наносить белковые маркеры, комплементарные к определенным вирусам. Когда вирус связывается со «своим» маркером, меняются характеристики наночастицы, что можно зафиксировать за несколько минут анализа. На рисунке 9.2 дана в качестве примера схема детектирования одиночного вируса гриппа. Нанопроволока 2 после обработки способна захватить вирус; 1 - нейтральна к вирусам. При захвате (*адсорбции*) всего одного вируса фиксируется падение электропроводности нанопроволоки 2, при его *десорбции* значение электропроводности восстанавливается. Графики на рисунке показывают, как проводимость кремниевых НП приборов реагирует на адсорбцию и десорбцию одиночного вируса.

Сегодня уже разработаны системы диагностики ВИЧинфекции на шесть порядков точнее традиционных. Новейший сенсор определения глюкозы срабатывает за 12 с. Через 3-5 лет вся процедура анализа крови принципиально изменится и не будет требовать высокой квалификации.

Особо можно выделить такие мультисенсорные системы, как «электронный нос» и

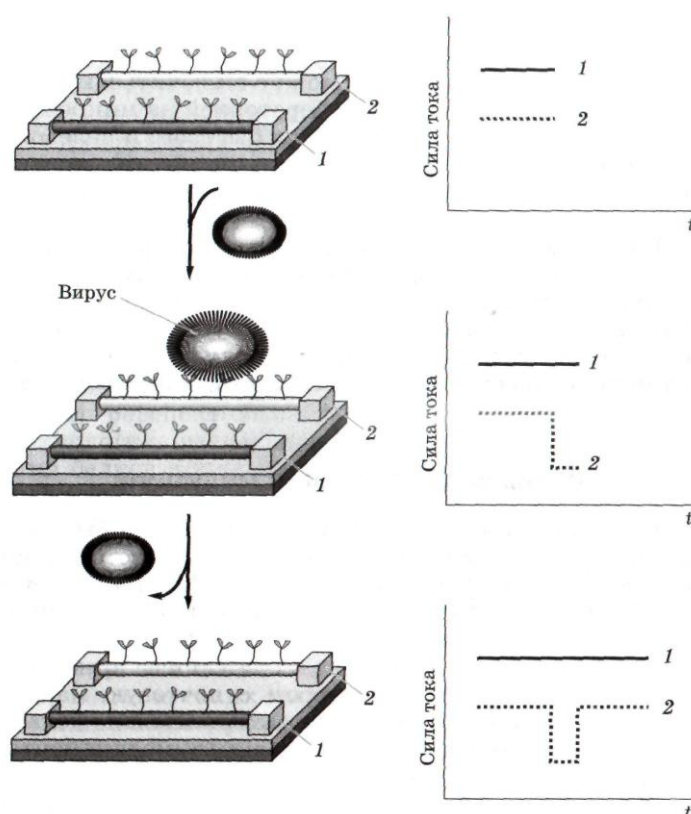


Рис. 9.2. Схема детектирования одиночного вируса двумя нанопроволочными (НП) приборами (1 и 2), модифицированными различными рецепторами [4]

«электронный язык», функции которых ясны из их названий [24*, 25*].

В качестве биологических датчиков и экспресс-анализаторов предлагается, в частности, использовать микроорганизмы, управляемые электрическим полем.

В последние годы ряд биосенсоров созданы на углеродных нанотрубках. Фотонный кристалл на поверхности «умной» чашки Петри позволяет фиксировать изменения в рассеянии света, вызванные заменой здоровых клеток на раковые или поврежденные токсинами.

Уже упоминалось использование квантовых точек в качестве флуорофоров. Если связать квантовые точки разных размеров (и следовательно, излучающие разные цвета) с маркерами, которые предназначены для определенных мишеней (пептидов, белков, ДНК), то мы получим многоцветное детектирование разных биообъектов (работы Института биоорганической химии РАН). Таким образом, одновременно детектируется много параметров изучаемой биологической системы. Квантовые точки - флуорофоры - стабильны, и в течение ряда дней или даже недель можно следить за эволюцией биосистемы.

Разные квантовые точки можно включить в микросферу, которая становится лабораторией на микросфере. Такая структура содержит код быстрого и целевого определения конкретного объекта и применима для диагностики рака и различных воспалительных заболеваний.

Объемные или пленочные наноразмерные датчики могут вводиться внутрь организма или подсоединяться к некоторым органам и вести непрерывный «репортаж» об их состоянии на молекулярном уровне. Информационный терминал, с которого можно считывать информацию, внешне может выглядеть, например, как серьга в ухе.

«Умные» устройства в медицине

Следующим естественным шагом должно быть создание «умных» микро и нанороботов, которые по результатам мониторинга в случае необходимости могут обратиться к врачу или самостоятельно инициировать ввод в организм нужных препаратов.

Прогнозируется появление в ближайшее время медицинского устройства размером с почтовую марку. Наложённое на рану, оно будет самостоятельно делать анализ крови, определять необходимые медикаменты и впрыскивать их.

Изготовлен чип, в котором используются живые клетки печени, органа, очень чувствительного к ядам и различным вирусам. Чип представляет собой две ультратонкие пластины из кремния, в его микронных ячейках располагаются клетки печени. Через чип циркулирует вода с питательными веществами, и клетки (их около 1,5 млн) через некоторое время самоорганизуются в структуру, характерную для живой печени. Такой чип, в частности, будет использован в оборудовании солдата будущего (см. гл. 11). Получив сигнал о наличии в организме вредных веществ, чип передаст его на медицинский компьютер, и либо солдат (космонавт) примет сам соответствующие меры, либо автоматически ему будут введены нужные лекарства.

Планируется создание персональных нанотерминалов с учетом особенностей ДНК данного человека.

Для развития нанотехнологии исключительно важными оказались результаты огромного международного проекта «Геном человека» (1990-2000), в результате которого удалось найти способ расшифровки генетической информации человека и тем самым открыть путь к созданию лекарств на принципиально иной основе (геномика). В XXI в. лекарства

будут выпускаться на основе индивидуальной генной информации буквально для каждого человека («лечение по заказу»). В процессе работы над проектом возник и начал развиваться перспективный раздел - биоинформационная технология, изучающая особенности функционирования белков в живых организмах, механизмы взаимодействия и обмена информацией на молекулярном уровне.

Новые имплантаты

Создание чипов, комбинирующих неорганические вещества и живые клетки, тесно связано с созданием имплантатов таких жизненно важных органов, как печень или поджелудочная железа.

Искусственная поджелудочная железа размером в половину однокопеечной монеты уже успешно испытана на крысах, страдавших диабетом.

Несколько лет назад была разработана методика восстановления хрящевой ткани без донорных клеток больного. Специальный гель, содержащий хрящевые клетки, с помощью артроскопии можно вводить через небольшие наружные надрезы. Новая ткань растет и интегрируется с нормальным хрящом, а гель саморазрушается через запрограммированный промежуток времени. Основу геля составляют *пептиды*, способные формировать витые волокна всего 10-20 нм в диаметре. Искусственная природа этих наночастиц исключает возможность заражения пациента.

Другой пример методики, находящейся на грани нано и биотехнологии, - создание искусственной работоспособной сосудистой системы. Искусственная кожа и хрящи уже успешно работают, но полноценный искусственный орган, такой как печень или почки, нельзя создать без развитой сложной системы кровоснабжения. Сеть артериальных и венозных капилляров диаметром от 10 мкм до 3 мм была выгравирована на кремниевой пластине, имеющей размер в поперечнике 15 см. Была создана зеркальная копия этой структуры, затем их сложили, введя внутрь биоразрушающийся полимер. Между слоями разместили микропористый мембранный слой, через который с одной стороны ввели клетки эндотелия, с другой - клетки ткани печени (почек). Клетки эндотелия выстелили внутреннюю поверхность сосудов, а биоразрушающийся полимер распался. Первые эксперименты на свиньях и кроликах оказались успешными.

Активно разрабатывается проект «искусственной сетчатки» глаза, в которой используются биологически совместимые НЭМС и МЭМС имплантаты. На линзе очков установлена миниатюрная камера, передающая изображение на микропроцессор, находящийся в дужке очков. Микропроцессор превращает сигнал с камеры в набор электрических импульсов и передает их с помощью вмонтированной в линзу очков радиоантенны. Принимающая антенна расположена вокруг радужной оболочки глаза. Она связана с крохотным имплантатом, который электродами соединен с глазным нервом. С помощью имплантата и происходит передача сигнала в мозг пациента.

Среди потребителей первых шести моделей - человек, который был слеп 50 лет. В клиническую практику усовершенствованную «искусственную сетчатку» предполагали ввести в 2007 г.

Разработаны нанопокрывтия имплантатов, позволяющие живым клеткам расти быстрее. В будущем имплантаты станут самолечащимися. Они будут иметь покрытие из наносенсоров, которые смогут идентифицировать конкретный вид микробов, выделить из своего резервуара нужное количество определенного препарата и затем с помощью тех же

сенсоров проконтролировать эффективность лечения. Правда, появление первых «интеллектуальных» имплантатов ожидается только лет через десять.

Доставка лекарства «по адресу»

Важнейшее применение наномедицины в ближайшем будущем - доставка в живом организме лекарства точно «по адресу».

Для эффективной доставки в организм лекарств используются разные методы. В пористые наноструктуры, типа биосиликона, внедряются лекарства, радионуклиды, протеины и пр. После доставки лекарства в нужную точку организма биосиликон распадается, лекарства и другие средства продолжают работать. Применяются также нанокapsулы с полезными веществами и витаминами. Но важно, чтобы лекарства попали в нужные точки организма, не повредив здоровые клетки и органы.

К настоящему времени разработаны первые наносистемы, состоящие из дендромеров - разветвленных полимеров, - которые могут иметь участки, комплементарные нуклеотидам ДНК. Один из дендромеров может выступать в роли маркера больных раковых клеток, другой является носителем флуоресцентной метки. При этом молекулы ДНК выступают в роли жесткого соединения, «скелета» этой сложной наносистемы (рис. 9.3). Таким пассивным методом можно проводить диагностику раковых опухолей: наносистемы прилипают маркерным концом к больной клетке, а флуоресцирующий конец указывает расположение опухоли. Во втором варианте (активный метод) флуоресцирующий конец заменяется на дендромер, несущий в себе лекарство (рис. 9.4). При этом за счет белкового маркера больных клеток лекарство доставляется точно «по адресу». Благодаря новой технологии наночастицы смогут стать одним из самых распространенных препаратов для лечения различных заболеваний.



Рис. 9.3. Наносистема для диагностики раковых клеток [8]

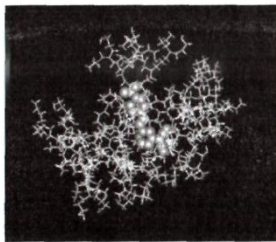


Рис. 9.4. Дендример, «захвативший» лекарство [8]

Углеродные нанотрубки рассматриваются как нанокapsулы для лекарств, однако их возможный вред для живого организма не изучен. Поэтому перспективными являются работы по созданию нанокapsул для лекарств из протеиноволипидных бионанотрубок (рис. 9.5). Эти бионанотрубки получают в результате процесса самоорганизации в растворе под воздействием электрического заряда. Варьируя заряд, можно добиться, чтобы трубки были открытыми или закрытыми (поэтому их назвали «умными»). Ученым удалось ввести в нанотрубки лекарство и по электрическому сигналу заставить их открыться. Кроме медикаментов, нанотрубки могут доставлять в клетки цепочки ДНК, кодирующие определенные гены, что может помочь в лечении генетических заболеваний и рака.

В 1986 г. в живых клетках были обнаружены веретенообразные капсулы



Рис. 9.5. Структура «умных» нанотрубок из белка тубулина, который формирует спирали. Снаружи нанотрубки покрыты двухслойной липидной мембраной [8]

из молекул белка, которые назвали наноконтейнерами. Они часто встречаются в живых клетках, но роль их в организме до сих пор не ясна. Генетически модифицированная мышь, в клетках которой эти биоконтейнеры отсутствовали, не имела никаких особенностей в развитии. В любом случае эти естественные контейнеры, по выражению открывшего их биохимика Л. Рома, представляют собой троянских коней для организма. Их можно нагрузить флюоресцентными метками, молекулами ДНК или лекарством, и организм их не отторгнет.

После проведения первых экспериментов предполагается расширить область применения биологических наноконтейнеров для создания биосенсоров для единичных клеток, для очистки окружающей среды от токсичных металлов и опасных биологических объектов и пр.

Наноматериалы в медицине

Уже сейчас наноматериалы находят свое применение в медицине. Так, трековые мембраны (см. гл. 7) используются для детоксикации плазмы крови, для фильтрации воды. Стоматологи пользуются высокоэстетичным универсальным пломбирочным материалом с наполнителем в виде наночастиц. Бактерицидный пластырь с наночастицами серебра позволяет убивать до 150 видов бактерий. Российскими учеными получен патент на таблетки наноструктурированного аспирина, которые в 5 раз легче обычных и во много раз эффективнее. Нанопористый полимер используется для улучшения биосовместимости в искусственном сердечном клапане. Имплантаты покрываются антисептиком, находящимся в нанокристаллическом состоянии. Уже используется методика лечения рака с помощью магнитных наночастиц.

В последние годы при синтезе новых эффективных лекарств все шире используется предварительное компьютерное моделирование. Не решая задачу синтеза целиком, такое моделирование позволяет исключить некоторые варианты синтеза, наметить перспективные пути и тем самым существенно снизить расходы на разработку технологии.

Перспективы медицинской диагностики

Достижения нанoeлектроники открыли возможность замены рентгеновского излучения в медицинской диагностике нанолокацией в субмиллиметровом диапазоне с щадящей интенсивностью, близкой к фоновой. В области ультразвуковой диагностики также планируется снижение уровня излучения с одновременным увеличением разрешающей способности.

Нанотехнология - «путь к бессмертию и свободе»

Одной из основных задач в медицине, идеалом, к которому стремится нанотехнология, остаются нанороботы, способные поддерживать правильное функционирование организма и уничтожать опасные для него клетки, вирусы, микроорганизмы. Эта задача была сформулирована в 80е гг. XX в. Э. Дрекслером и развита им вместе с Р. Фрайтасом. Нанотехнология рассматривается как «ключ к бессмертию и свободе», возможность существенно продлить полноценную жизнь человека и даже усовершенствовать некоторые функции его тела и мозга.

В качестве примера возможности увеличения памяти рассматривается проект наноэлемента памяти размером с клетку печени (но меньше объема, занимаемого нейроном). Один такой элемент памяти сможет хранить информацию, эквивалентную информации Библиотеки Конгресса США или Ленинской библиотеки в Москве. Имплантация его в

мозг человека вместе с устройством, обеспечивающим доступ к нему, сделает реальностью сюжеты фантастических фильмов.

Фрайтас теоретически разработал нанороботреспироцит, который фактически является искусственным эритроцитом и может переносить в двести с лишним раз больше кислорода, чем естественная красная клетка. Больному человеку будут вводиться путем инъекции несколько кубических сантиметров нанороботов, растворенных в жидкости, т. е. от нескольких миллионов до нескольких триллионов (10^{12}) нанороботов. Инъекция 50% го раствора респироцитов объемом 5 см³ вдвое увеличит несущую способность крови.

Имея в крови 1 л такого раствора (еще допустимая величина), человек, например, может 4 ч находиться под водой, не пользуясь легочным дыханием.

Респироциты будут иметь сенсоры, позволяющие врачу ими управлять: включать и выключать.

На рисунке 9 на цветной вклейке художник изобразил будущего наноробота, следящего за «порядком» в кровеносном сосуде. Соответствующий этому рисунку и аналогичные минифильмы можно посмотреть на сайтах [5].

Ставится задача ликвидации последствий старения организма и предупреждения процессов старения. Нанороботы будут «ремонтить» клетки, удалять накапливающиеся вредные продукты обмена, корректировать повреждения ДНК и т. п. Не исключено, что в будущем будет перепроектирована сама ДНК, так что организму будет обеспечена «вечная молодость», причем в случае необходимости клетки сами будут создавать нанороботов - дополнительные охранные клетки. Все это может стать реальностью уже во второй половине XXI в.

Дистанционная хирургия

В настоящее время уже существуют предшественники нанороботов и нанозондов, пока в миллиметровом масштабе.

Китайские ученые построили управляемый магнитным полем микрозонд размерами $3 \times 3 \times 1$ мм, который может перемещаться по кровеносной системе человека. Использование магнитного поля в наномедицине представляется очень перспективным, так как биологические ткани для него прозрачны, а магнитное поле для них безвредно.

NASA финансирует разработку микроскопических медицинских роботов, вводимых в организм космонавта и предохраняющих его от радиации.

В области хирургии ставится задача отойти от традиционных методов, основанных на вскрытии органов и полостей. Применение микро, позже нанороботов обеспечит более высокий уровень точности, чем работа рук хирурга. Используемые в современной хирургии методы (например, *лапароскопия*) являются переходом

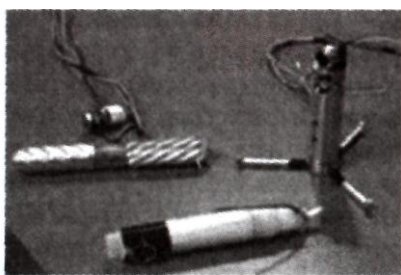


Рис. 9.6. Микророботы-хирурги размером 8 см [14]

к дистанционно управляемым микрозондам и микрохирургам. Роботизированные хирургические инструменты могут управляться сквозь «глазок» в теле пациента, что позволяет избежать дополнительного травматизма, вызываемого большими разрезами. Однако небольшие надрезы сильно ограничивают поле зрения, этого недостатка лишены операции с помощью автономных роботов. В некоторых случаях, например при проведении операций на пищевари-

тельном тракте, использование роботов-хирургов вообще не требует разрезов. Многообещающей перспективой является использование нанороботов для взятия *биопсии*.

Дистанционное управление позволит решить задачу квалифицированного обследования или хирургического вмешательства на расстоянии, что принципиально важно при боевых действиях, природных катастрофах.

Впервые к помощи роботов прибегли в 2000 г. хирурги медицинского факультета Вашингтонского университета во время операции на сердце, с тех пор механизированные инструменты стали применяться при проведении целого ряда медицинских процедур. Год спустя нью-йоркские доктора использовали дистанционно управляемого робота для удаления желчного пузыря женщине, находящейся во Франции в городе Страсбурге.

В США создали дистанционно управляемых роботов (рис. 9.6), способных проводить хирургические операции. Введенные в брюшную полость пациента через крошечный надраз, они могут управляться как хирургами, стоящими около операционного стола, так и находящимися на расстоянии сотен километров. Минирурги снабжены осветительными лампочками и камерами, что позволяет им передавать видеоизображение оперируемого участка. Набор специальных приспособлений позволяет останавливать возникающие в процессе операции внутренние кровотечения. Подвижные механические суставы способны облегчить доступ и проведение различных манипуляций в определенных местах организма, оперирование которых ранее приводило к обширным повреждениям кожи и других тканей.

Естественно, нанороботы в человеческом организме будут лишены возможности репликации (размножения). Кроме того, в их бортовых компьютерах будут системы предотвращения сбоев - независимый многократный контроль, устройство блокировки работы при сбое, система остановки при выводе из организма.

Предполагается специализация медицинских нанороботов не только по функциям и строению, но и по области их работы (кровеносная система, легкие, конкретная опухоль и пр.). С этой целью сенсоры нанороботов будут запрограммированы на индивидуальную последовательность белков тех клеток, которые необходимо «обслуживать». И все же нанороботы не будут активированы, пока не поступит сигнал (например, акустический) от врача. В течение всей деятельности должна осуществляться и обратная связь: к врачу все данные должны поступать от нанороботов.

Источником энергии нанороботов прежде всего может быть метаболизм кислорода и глюкозы. Возможен и ряд источников энергии вне тела человека. Так, при клиническом обследовании акустическая энергия может быть и основой обмена информацией между врачом и нанороботом, и источником энергии последнего.

Зыбкость грани между нано и биотехнологией в области медицины вызывает определенную ревность к их сравнительной роли в будущем медицины у представителей двух этих направлений. Все же они сходятся в необходимости сочетания обоих подходов в такой сложнейшей системе, как живой организм. Полагают, что прогресс в создании био и искусственных наносистем может привести к созданию гибридных бионаносистем, уникальных по структуре и функциям [6].

По прогнозам специалистов, к 2010 г. мировой рынок нанотехнологических изделий для потребностей биомедицины составит 3,4 млрд долларов.

Вопросы для самоконтроля

1. Какая способность биологических структур делает их перспективными для организации процессов самосборки в нанотехнологии?
2. Где используются биочипы?
3. В чем преимущества микро и нанороботовхирургов?
4. Как можно доставлять лекарства в живой организм строго «по адресу»?
5. Какие идеи по использованию нанороботов в человеческом организме высказаны Э. Дрекслером, Р. Фрайтасом и др.?

Задания

1. Оформите стенд о микро и нанороботаххирургах.
2. Сделайте доклады о физических и химических сенсорах, биосенсорах, о применении биочипов, в том числе в программе «Геном человека».
3. Подготовьте для школьников младших классов показ минифильмов о медицинских нанороботах для исследования человеческого организма.
4. Придумайте механизм управления, включающий выделение уже доставленного лекарства в нужный момент (например, при ухудшении показателей анализа крови).

Литература

1. Будников Г. К. Что такое химические сенсоры//СОЖ. 1998. №3.
2. Варфоломеев С. Д. Биосенсоры//СОЖ. 1997. № 1.
3. Кобояси И. Введение в нанотехнологию. М.: БИНОМ, 2005.
4. Чикичев С. Полупроводниковые нанопроволочные сенсоры//Перс Т. Т. 12. Вып. 2005. 15/16. Материалы сайта <http://perst.isssp.kiae.ru>
5. <http://www.foresight.org/Nanomedicine/Gallery>
6. Свидиенко Ю. Г., Чубенко А. Е. Будущее медицины: биотех или нанотех?//Наука и жизнь. 2005. № 2.
7. Сойфер В. Н. Международный проект «Геном человека»//СОЖ. 1998. № 12.
8. Свидиенко Ю. Г. Умные нанотрубки в доставке лекарств. Дендромерные ДНКнаночастицы помогут бороться с раком и другими заболеваниями, <http://www.nanonews.net.ru>
9. Алексеева О. BIONA - бионаносистемы будущего//Перс Т. Т. 11. 2004. Вып. 4. <http://www.isssp.ras.ru>
10. Электронная версия газеты «Стоматология сегодня»//Архив № 6 (37). <http://dentodav.ru/37/art17.shtml>

Занятие 11.

Лекция: Нанотехнология в быту. «Умная» одежда и обувь

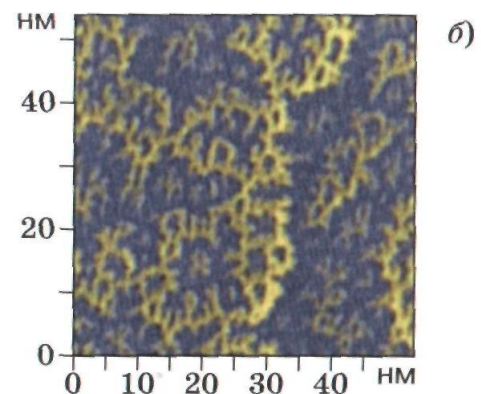
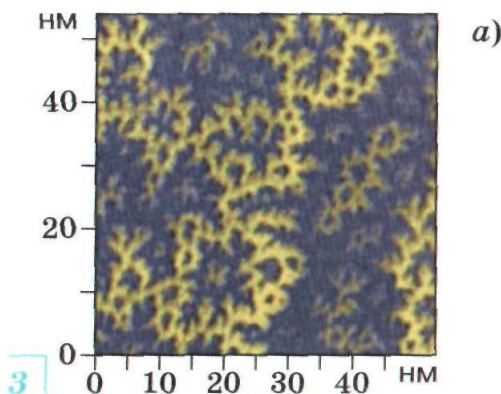
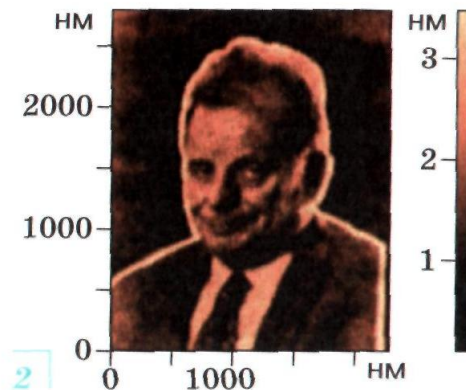
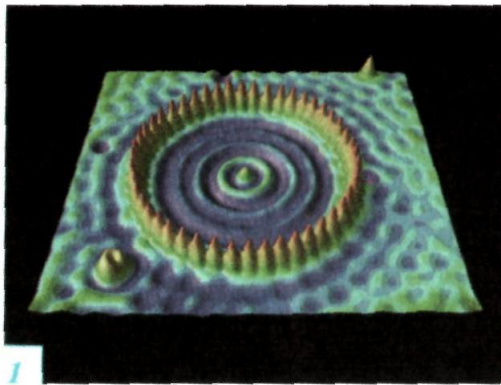
Нанотехнология в производстве средств гигиены

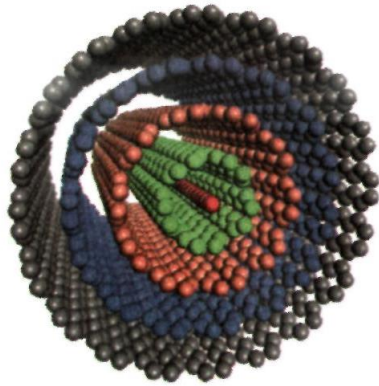
Основные применения нанотехнологии в нашей повседневной жизни связаны с достижениями наноэлектроники. Быстрое уменьшение размеров и увеличение числа функций сотовых телефонов, персональных компьютеров, плееров, переход на новые компактные носители информации - все это произошло за последние годы.

Ниже мы рассмотрим несколько областей применения нанотехнологии в быту.

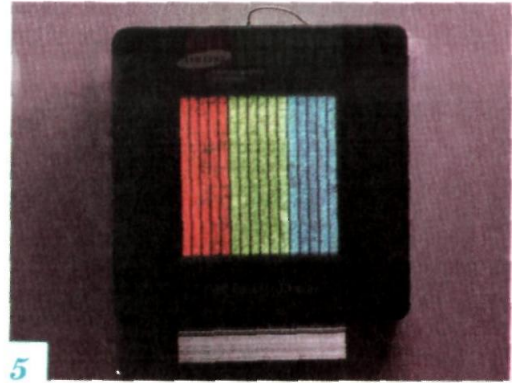
В меньшей степени мы, как пользователи, можем проанализировать достижения нанотехнологии в повседневной медицинской практике и гигиене, хотя в конкретных случаях это ощущаем. Например, выпущены повязки для обеззараживания хронических гноящихся ран, содержащие наночастицы серебра размером 10-30 нм. Наночастицы убивают даже те микроорганизмы, которые малочувствительны к стандартным антисептикам. Наночастицами серебра компания «Samsung» покрывает некоторые модели сотовых телефонов. Покрытие этими наночастицами барабана стиральной машины обеззараживает белье при стирке.

Немецкие ученые вводят ионы серебра в одежду и постельное белье, которые предполагают использовать при экземе и других нарушениях кожного покрова.





4



5

1. «Загон для скота». Разная интенсивность электрического поля с помощью компьютера выражена в условных цветах.
2. Академик Жорес Иванович Алферов, лауреат Нобелевской премии по физике 2000 г.
3. Ферромагнитные домены в кристалле никеля (в условных цветах), полученные с помощью магнитного сканирующего микроскопа при комнатной температуре (а) и 232 °С (б).
4. Компьютерная модель многослойной углеродной нанотрубки («матрешки») с нанопроволокой внутри.
5. Цветной дисплей на углеродных нанотрубках фирмы Samsung.



6



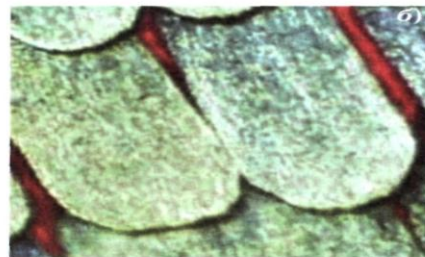
б)



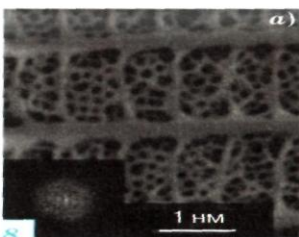
в)



7

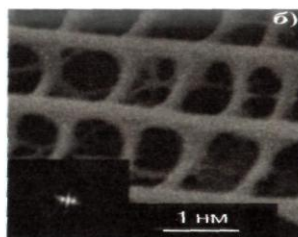


б)



8

1 нм



б)

1 нм



9

6. Морской червь Genus Aphrodita (а), его радужные иголки (б) и изображение поперечного сечения иголки в сканирующем электронном микроскопе (в).
7. Бабочка Morpho rhetenor (а); детали выделенного участка ее крыла (б).
8. Фотографии в сканирующем электронном микроскопе крыла тропической бабочки (а) и бабочки из северных районов (б).
9. Наноробот в кровеносном сосуде.

Нанопокрyтия

Обычный материал - дерево, камень, бумагу, стекло и пр. - можно покрыть специальным нанослоем, придающим этому материалу необычные свойства. Подробнее с разнообразными нанопокрyтиями и их использованием в быту можно познакомиться на сайте. Там же можно увидеть соответствующие минифильмы.

Запотевание обычных стекол в автомобилях, защитных очках спортсменов может привести к серьезным авариям, а специальные спреи работают недолго. Разработанное в Массачусетском технологическом университете покрытие состоит из полимерных слоев и наночастиц кварца. Вместо крошечных капель, рассеивающих свет, вода покрывает стекло ровным прозрачным слоем. Такое покрытие в ближайшие годы будет использоваться для автомобильных стекол, зеркал для ванных комнат, линз цифровых фотоаппаратов, спортивных очков и пр.

Германские специалисты разработали краску для внешней окраски домов, которая «отталкивает» грязь и влагу и надолго сохраняет свои качества.

Самоочищающиеся покрытия для тканей создают фантастический эффект защиты одежды от грязи, жира, кофе и пр.

Создана водонепроницаемая бумага с защитным слоем из наночастиц. Раньше на бумаге писали текст, а затем ее обрабатывали; на новой бумаге можно писать ручкой, карандашом или краской, в том числе под водой, последующая обработка не требуется. Для «аквабумаги» уже разработана дешевая и эффективная технология.

Знаменитая фирма «Kodak» представила многослойную (9 слоев) бумагу для струйных принтеров; в каждом слое присутствует свой сорт наночастиц, обеспечивающий определенную функцию. Так, в верхнем слое керамические наночастицы создают блеск и плотность бумаги. Пигментные наночастицы улучшают качество печати, а полимерные обеспечивают быструю фиксацию краски.

Внедрение нанотехнологии в производство парфюмерии и пищевую промышленность

Косметика, улучшенная с помощью нанотехнологии, стала не только эффективнее, но и вошла в моду (что способствует дальнейшему развитию этой отрасли). Нанокapsулы, в которых содержатся полезные для кожи вещества, имеют размер 50-200 нм и легко проникают внутрь клеток эпидермиса. Аналогично действуют кремы против болей в суставах и мышцах, появляющихся при интенсивных занятиях спортом.

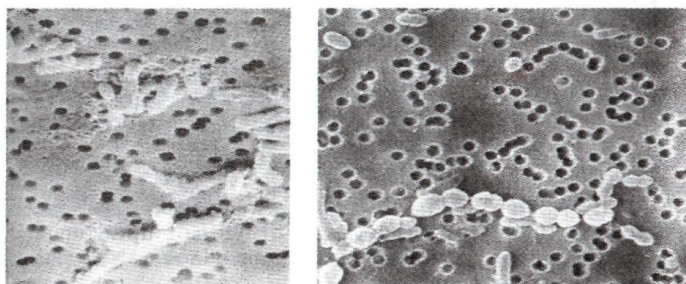


Рис. 10.1. Кишечная палочка и стрептококки на трековой мембране (фотография получена с помощью электронного микроскопа) [1]

Малые размеры нанокapsул в некоторых дезинфицирующих средствах позволяют им проникать через клеточные мембраны микроорганизмов, обеспечивая высокую эффективность при отсутствии побочных эффектов для человека.

В пищевой промышленности нанотехнология прежде всего поможет различными сенсорами контролировать качество и безопасность пищи. Наномембраны обеспечивают эффективную фильтрацию воды от примесей и микроорганизмов (рис. 10.1).

Новые спортивные товары

Успехи применения нанотехнологии в этой области связаны в основном с новыми материалами.



Рис. 10.2. Теплоизолирующий материал Aspens Pyrogel. Температура пламени газовой горелки 1000 °С [30*]

Швейцарская компания изготовила для соревнований Tour de France 2005 спортивный велосипед массой всего 1 кг. Его рама была сделана из композиционного материала на основе углеродных нанотрубок.

Одна из японских компаний производит с использованием нанотехнологий клюшки для гольфа, которые на 12% жестче титановых и позволяют увеличивать дальность полета мяча на 13 м. Клюшки пользуются повышенным спросом.

В 2002 г. на Кубке Дэвиса были опробованы мячи, при изготовлении которых использовалась нанотехнология.

Новым утеплительным материалом для обувных стелек пока в качестве эксперимента пользуется одна из канадских лыжных команд, элитное подразделение армии США. Его использовала команда лыжников, выигравшая в 2004 г. марафон к Северному полюсу. Материал состоит из полимера с нанопорами; на рисунке 10.2 наглядно изображены его теплоизолирующие свойства.

Мазь для лыж с использованием наночастиц позволяет им лучше скользить по снегу.

«Умная» одежда и обувь

Отдельного рассмотрения требует «умная» одежда - одежда и обувь, реагирующие как на внешние условия, так и на состояние (физическое и психическое) своего владельца. В этой области уже имеются конкретные разработки, однако говорить о приемлемой стоимости и начале массовых продаж пока рано.

В ткань, готовую одежду или обувь интегрируются электронные приборы, замаскированные провода и аккумуляторы. С развитием нанотехнологии электронные элементы одежды становятся все меньше, они буквально вплетаются в ткань, сохраняя ее мягкой. Разработки «умной» одежды перспективны для обеспечения безопасности (в том числе при освоении космоса и в военном деле), в здравоохранении, сферах коммуникации и развлечений. Важно при этом, чтобы «умная» одежда не теряла своих качеств при стирке, что учитывается ведущими фирмами в новых сериях стиральных машин.

В ноябре 2003 г. в Париже, Берлине, Барселоне в рамках европейской недели науки и технологий проходил показ «умной» одежды.

Прежде всего следует выделить «умную» одежду для опасных, экстремальных условий.

Специальная одежда для врачей защищает от радиации, содержит сенсоры физического состояния и передает на контрольный пульт текущие физиологические параметры человека. Текущая фиксация физиологических параметров важна и для тренирующегося спортсмена (сенсоры включены в бандажи).

Особая терморегулирующая одежда охлаждает тело в жару, а при понижении внешней температуры излучает тепло. Самым легким в мире материалом считают материал из аэрогеля «Абсолютный холод», который на 99,8% состоит из воздуха. Одежда из него

предназначена при работах до 80° С. При этом такая одежда может пропускать естественную влагу наружу, «запирая» ее в своих внешних слоях.

Подушки безопасности, давно используемые в автомобилях, применяются в жилетах для скалолазов, любителей конного спорта, велосипедистов, страхуя их при падении. В одном из предлагаемых вариантов в куртку вшит сенсор, фиксирующий резкие наклоны корпуса (падение) и сообщающий об этом в службу спасения.

В ВМФ США разработали жилет для пилотов, стимулирующий внимательность и определяющий направление возможной опасности. В жилет вшиты тактильные стимуляторы, которые в определенной ситуации заставляют пилота обратить внимание в нужном направлении.

Фирма «Adidas» выпустила модель кроссовок, включающую микропроцессор, систему сенсоров с магнитами, измеряющую силу воздействия на подошву, и имитацию искусственных мускулов. Магнитный сенсор выполняет до 1000 замеров в секунду, процессор обрабатывает результаты этих замеров и подошва меняет свою жесткость, адаптируясь к почве и темпу ходьбы или бега. Такие кроссовки помогут спортсменам, геологам, путешественникам меньше уставать при больших и сложных переходах. Фирма «Nike» выпустила кроссовки с iPod браслетом, фиксирующим километраж.

В американском варианте в кроссовки встроен GPS приемник (система спутниковой локализации), что позволит не потеряться детям, людям с нарушениями памяти или другими болезнями. В кроссовки также вмонтирована тревожная кнопка. Как выразился один из авторов статей об «умной» одежде, «лет через десять, чтобы завязать шнурки, достаточно будет прикрикнуть на кроссовки».

«Умная» одежда входит и в повседневную жизнь. Английские специалисты в области нанотехнологии в ближайшее время обещают появление в магазинах костюмов, отгоняющих комаров и москитов, в жаркое время создающих охлаждающий эффект за счет выделения наночастиц ментола, а также носков, содержащих абсорбенты и благоухающих цветочным ароматом. Во всех случаях в ткань внедряются увлажняющие, дезодорирующие частицы, частицы витаминов и абсорбентов, включенные в специальные капсулы, которые в небольших количествах разрушаются при движениях человека. Тем не менее свойства одежды сохраняются после 30 стирок.

На базе нанотехнологии в Институте катализа Сибирского отделения РАН разработали самонагревающиеся стельки, которые прошли испытания на войне в Чечне. В них используется сорбент, поглощающий влагу и выделяющий тепло. Британские медики разработали одежду-массажер для лечения стенокардии.

Военные специалисты утверждают, что об изменении состояния человека можно судить по специфическим запахам, это столь же информативно, как измерения пульса и температуры. Соответствующий анализ и медицинская помощь могут быть использованы и в мирных условиях, когда «умное» белье вовремя сделает инъекцию, скажем, инсулина.

В Гонконгском политехническом университете для получения самоочищающихся тканей используют покрытие из наночастиц диоксида титана: на свету это покрытие расщепляет органические загрязнители.

Мобильные телефоны и MP3 плееры стремительно вошли в наш быт, но их, строго говоря, носить неудобно. Они должны составлять часть «умной» одежды. Еще в 2000 г. фирма «Levis» выпустила куртки со вшитыми мобильниками и плеерами, что позволяет

разговаривать и слушать музыку во время работы или при вождении автомобиля. Немецкая фирма «Infineon» предложила куртку с вшитым MP3-плеером, а сейчас вместе с модельерами мюнхенской школы она работает над MP3-плеером, управляемым голосом. И этот плеер уж не шит в одежду, а интегрирован непосредственно в материал одежды.

Еще более функциональны новые скафандры NASA. Они являются примером сочетания одежды с искусственным интеллектом. Специальная одежда XXI в., по мнению исследователей университета в Беркли (США), должна представлять собой локальную компьютерную сеть, связанную как с Интернетом, так и с другими локальными сетями с помощью беспроводных технологий.

Упомянутая выше фирма «Infineon» сделала также важный шаг в получении питания для носимой микроэлектроники за счет встроенного термогенератора, использующего разность температур между телом человека и поверхностью одежды. Разность температур около 5 °С обеспечивает выходную мощность до нескольких микроватт на квадратный сантиметр, что достаточно, например, для питания медицинских датчиков и простых микросхем. Обратную задачу решила другая фирма, предложившая нагревающийся жакет для мотоциклистов и велосипедистов. Механическая энергия при движении превращается в электрическую, в одежду вплетены гибкие проводники, обеспечивающие ее нагрев до +43°С.

Выпускается рюкзак с панелью солнечных батарей, позволяющей заряжать телефоны, видеокамеры, карманные компьютеры, GPS приемники, плееры и пр. Он, несомненно, окажется полезным путешественникам и туристам.

Вместе с тем многие модели «умной» одежды имеют встроенную технику, отдающую всего лишь дань моде и тщеславию владельца. Так, компьютеризированные ботинки одной из фирм еще комфортнее при ходьбе, чем упомянутые кроссовки фирмы «Adidas». Но, кроме того, они включают в себя модуль хранения информации и беспроводной коммуникационный модуль, что позволяет им присоединяться к персональному компьютеру и обмениваться информацией с другими такими же ботинками, например, музыкальными мелодиями или визитками. Заметим, что более дешевый вариант ботинок позволяет обмениваться визитками только с такими же ботинками.

Дизайнеры курток предлагают выразить свою индивидуальность, используя гибкие жидкокристаллические дисплеи, вшитые в куртку спереди и на спине. Более того, эти дисплеи могут быть подключены к мобильнику. Питание дисплеев производится от трех пальчиковых батареек. Текст на экране может быть в виде бегущей строки, может пульсировать цветом в соответствии с музыкой в плеере хозяина.

Один из итальянских дизайнеров разработал ткань «рубашки для ленивых», у которой рукава за считанные секунды поднимаются до локтя, если человеку жарко. При понижении температуры среды или температуры тела рукава вновь удлиняются. В ткани использована так называемая «память формы», которая в данном случае обеспечивается введением в нейлоновую ткань нитинола (NiTi). Рубашку не нужно гладить, даже если ее скомкать и надолго засунуть в ящик, она восстановит форму через 30 секунд. Очень высокая цена определяет существование в настоящее время всего нескольких сотен «рубашек для ленивых».

«France Telecom» и «Philips» поместили на экспериментальные модели одежды гибкие беспроводные дисплеи, отражающие эмоции хозяина, зафиксированные сенсорами.

Забавным выглядит «умное» одеяло канадца Н. Стедмана, которое отслеживает движения хозяина с помощью 40 тактильных датчиков, само его находит и укутывает.

Ряд аналитиков считают бум вокруг повседневной «умной» одежды искусственным, рекламным. Однако, по оценке корейских государственных экспертов, уже к 2014 г. мировой рынок «умной» одежды может составить 7 млрд долларов. Поэтому Южная Корея поставила своей задачей контролировать 20% этого рынка, и ее правительство объявило о государственной поддержке производителей «умной» одежды. Начиная с 2004 г. при участии правительства, которое не хочет отпустить эту проблему «на волю рынка», в Южной Корее ведутся активные разработки в этой области объединенными усилиями научно-исследовательских организаций, университетов и коммерческих объединений.

Вопросы для самопроверки

1. Какие примеры использования нанотехнологии в спортивных товарах вы можете привести?
2. Какие варианты «умной» одежды разработаны для экстремальных условий?

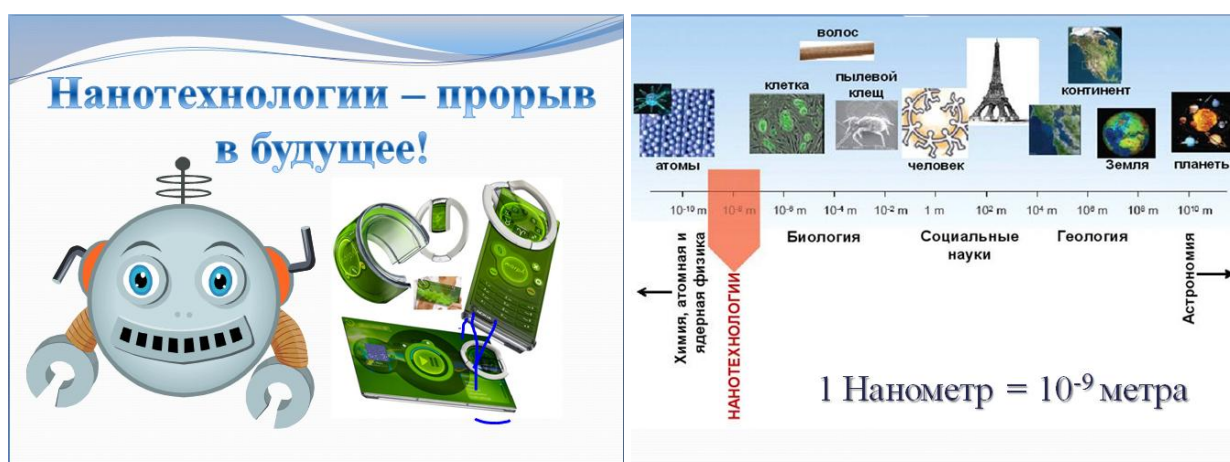
Задания

Найдите на указанном в списке литературы сайте сведения о товарах, в которых используются нанотехнологии; объясните принцип их действия.

Литература

1. Кудояров М. Ф., Возняковский А. П., Басин Б. Я. Трековые мембраны: получение, применение в медицине и биологии и перспективы//Российские нанотехнологии. Т. 3. 2008. №11-12.С.90-95.
2. <http://www.nanonewsnet.ru>

Презентация к лекции



«Левша»

«Если бы, был лучше микроскоп, который в пять миллионов увеличивает, так вы изволили бы увидеть, что на каждой подковинке мастерово имя выставлено: какой русский мастер ту подковку делал»



Медицина

- 1) Нанолечения
- 2) "Нанотранспортеры", доставляющие нанолечения в конкретный орган человека по кровеносной системе
- 3) "Нано-чистильщики", избавляющие стенки сосудов от холестериновых бляшек, и лечащие сосуды изнутри

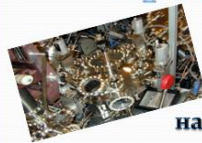


Быт

- 1) Пленка для стекол автомобиля
- 2) Лечебная одежда
- 3) Косметика
- 4) В далёкой перспективе заказ одежды с заданными параметрами, бытовых приборов, мебели, и украшений



Промышленность



Большая номенклатура промышленно изготавливаемых наноматериалов: металлических, гидрооксидов, оксидов и композитных порошков, которые уже находят широкое применение во многих секторах промышленности и строительства

Военная техника

Возможность создания "невидимых" военных объектов и средств противодействия "невидимости", самовосстанавливающихся военных механизмов, сверхпрочной брони, новых систем связи и разведки, сверхпрочной военной амуниции, повышения живучести всех военных объектов и т.д.



Сельское хозяйство

Нанотехнологии могут стать ключом к решению проблемы бедности во всём мире.

Главные задачи:

- 1) очистка воды
- 2) производство экологически чистого топлива
- 3) увеличение плодородности почвы



Предполагается, что в домах вместо холодильников появятся мини-фабрики пищевых продуктов, изготавливающих по заказу любой продукт

Высокие технологии

Применение наноматериалов сможет создать новые типы дисплеев и телевизионных экранов с трёхмерным изображением.



Университетские лаборатории работают над созданием "вечного" элемента питания, который не будет нуждаться в подзарядке. Предполагается создание компьютера, обладающего человеческим интеллектом.



Занятие 12.

Лекция: Нанотехнология в военном деле. Костюмы солдата, спасателя, космонавта Влияние нанотехнологии на военные доктрины

Нанотехнология, основа третьей научно-технической революции, входит во все сферы человеческой жизнедеятельности, от освоения космоса до косметики. В военном деле, по мнению специалистов, внедрение нанотехнологии может привести к изменению военных доктрин. Это предположение подтверждается на примере новой военной программы США «Future Combat Systems» (FCS), оцененной первоначально в 92 млрд долларов, которую сравнивают с известной в прошлом программой ПРО². Идея программы заключается в объединении всех сухопутных, морских, воздушных сил (пилотируемых и беспилотных), а также солдат в единую сеть, «матрицу».

Применение нанотехнологии в военном деле прежде всего связано с успехами ее применения в современной электронике и робототехнике. Новая модель американской армии FCS включает две «надсистемы», из которых первая - мощная информационная сеть, связывающая между собой все компоненты: от солдат до боевых машин и медицинских роботов, и 18 компонент, представляющих собой управляемые и автоматические (роботы) наземные и воздушные машины (рис. 11.1). Предполагается, что около трети военной техники США к 2015 г. будет работать в полуавтономном режиме.

Эта новая модель армии пока только разрабатывается, в законченном виде ее надеются получить к 2025 г.

Аналитики [1] в связи с этим отмечают, что роль лидера в области военных разработок оказывается самой сложной, а неизбежные ошибки слишком дорогостоящими. В качестве примера приводится программа ПРО стоимостью в десятки миллиардов долларов, которая оказалась неэффективной против советских ракет. Однако этот путь стимулирует развитие не только технологии, в данном случае нанотехнологии, но и науки.

Костюм солдата будущего

К числу новых доктрин в военном деле относится также принципиально иное отношение к экипировке солдата будущего, входящего во вторую «надсистему» проекта FCS.

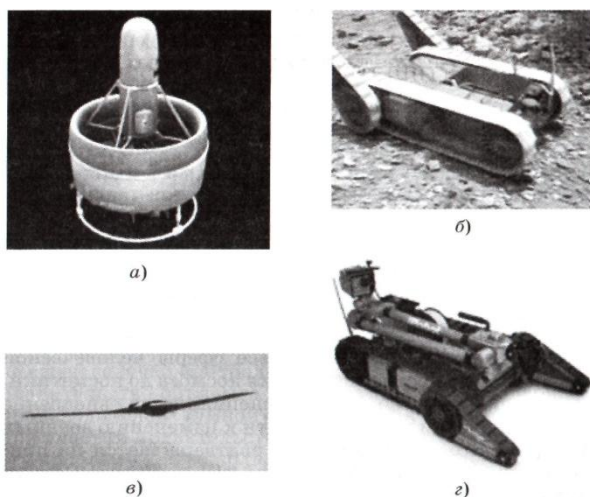


Рис. 11.1. Беспилотные военные механизмы:
а — беспилотный самолет;
б — робот-сапер, применявшийся США в Афганистане;
в — самолет-разведчик «летающее крыло»;
г — новый робот-сапер

Проанализировав военные операции в Афганистане и Ираке и проведя ряд консультаций с ведущими учеными США, руководство американской армии сформулировало задачу «избежать потерь в живой силе» как одну из основных в военно-научных исследованиях.

² Американская программа противоракетной обороны (вторая половина XX в.).

Радикальное повышение, с одной стороны, боеспособности солдата, а с другой - его выживаемости в сложных условиях возможны только при использовании нанотехнологии. Фактически речь идет о костюме человека, работающего в экстремальных условиях (солдата, пожарника, спасателя, космонавта и т. п.). Во всех случаях костюм должен обеспечить механическую, химическую, радиационную, биологическую защиту, связь с центром и другими членами группы и при этом быть достаточно легким и удобным.



Рис. 11.2. Демонстрация костюмов солдата будущего в Капитолии, 2004 г. [2]

Например, вес костюма американского солдата во время войны в Ираке был 48 кг, для обычного пехотинца этот вес доходит, до 60 кг, а костюм солдата 2010 г. (см. ниже) будет массой около 22 кг и при этом более функциональным.

Костюм человека, работающего в экстремальных условиях, служит примером

комплексного применения достижений нанотехнологии.

Начиная с 90х гг. XX в. во всех странах разрабатываются проекты обмундирования солдата будущего. Наряду с проектами, разрабатываемыми в США, известны британский проект «FIST» и австралийский «Windurra». Тем не менее США является лидером подобных разработок, в том числе по объему открытой информации. Заметим, что ряд разработок военного снаряжения, принятых в армии России, не уступают зарубежным и даже их превосходят. Осуществляется федеральная программа «Боец XXI века», по которой к 2015 г. будет создан российский вариант костюма солдата будущего.

На базе Массачусетского технологического института в первые же годы XXI в. по инициативе и финансовой поддержке Минобороны США был создан специальный Институт солдатской нанотехнологии (Institute for Soldier Nanotechnologies).

Несмотря на то, что экипировка американских солдат непрерывно совершенствовалась, отдельные не связанные друг с другом улучшения оказывались не всегда полезными, а иногда входили в конфликт. Проект предусматривает принципиально новую концепцию солдата, который за счет «умного» костюма, системы позиционирования и навигации, встроенности в общую структуру боевой группы (минироботы, беспилотные летательные аппараты и пр.) будет автономным, быстродействующим и выживаемым. Броня костюма будет интегрирована с емкостями для хранения воды, боеприпасов, источников питания и информационной системой.

Главный ученый армии США М. Эндрюс по этому поводу проводит аналогию с «хищником» из одноименного фильма - новый костюм получил условное название «костюм скорпиона».

Отдельные части «костюма скорпиона» уже созданы и прошли специспытания. Кроме МТИ, в работах участвуют ряд крупнейших американских корпораций («DuPont», «Raytheon» и др.). В 2004 г. на выставке в Капитолии были представлены две демонстрационные модели: солдат 2010 и 2020 гг. (рис. 11.2, 11.3).

В разработке дизайна нового оружия и униформы участвует Голливуд с его огромным опытом в области индустрии развлечений.

Использование новых материалов в «костюме скорпиона»

Одна из основных деталей костюма солдата будущего - бронезилет. Бронезилет будет иметь толщину всего несколько миллиметров и создать его предполагается на основе полиуретановых волокон диаметром около 100 нм, близких по структуре к паутине, но только более легких и гибких. Сочетание гибкости с необходимой жесткостью, как обычно, достигается созданием композиционного материала: к определенным местам волокон присоединяются наночастицы, объединяя волокна в прочную сетку.

Большинство необходимого оборудования будет интегрировано в сам костюм: между волокнами основной ткани будут вплетены разнообразные «умные» наноструктуры, позволяющие распознавать химические и биологические токсины, реагировать на удар или кровотечение меньше чем за секунду, поддерживать нормальную температуру тела. Характерная для композиционных материалов многофункциональность достигнет фантастического развития. Микроклиматическая система будет автоматически нагнетать в специальные капилляры одежды теплый или прохладный воздух. В костюм будут вмонтированы гибкие солнечные панели, что заметно повысит автономность солдата. Предполагается также автоматическое «камуфляжное» изменение цвета и преломление света с целью достижения частичной «невидимости».



Рис. 11.3. Шлем «костюма скорпиона» [2]

МЭМС и НЭМС системы

Разработка экзоскелета, учитывая его разнообразные функции, - сложная задача. На первом этапе в костюм будут вмонтированы уже существующие МЭМС-акселерометры (аналогичные детекторам подушек безопасности в автомобиле), которые через несколько лет заменят на НЭМС-акселерометры. Реакция экзоскелета будет мгновенной (меньше секунды) и не зависящей от солдата. Например, определенные его участки могут стать по сигналу медицинского компьютера жесткими и превратиться в шину для поврежденной конечности. Аналогична реакция на ударную волну от пуль и осколков: мгновенно поражаемая часть костюма становится жесткой, а особенности применяемых в костюме полимерных материалов (исследователи пока не отказываются от применения полимерных материалов типа кевлара или русского армса) позволят распределить кинетическую энергию удара по достаточно большой площади.

Для решения всех этих задач необходимо с помощью математического моделирования определить оптимальные места расположения датчиков. Затем следует проверить предлагаемый новый полимерный материал на совместимость с живой тканью при длительном контакте. Наконец, необходима разработка программы для медицинского компьютера.

Экзоскелет

Предполагается, что специально сконструированные наномашинки - усилители экзоскелета модели 2010 г. увеличат силу солдата на 35%, модели 2020 г. - на 300%. По словам специалистов, скорее не солдат будет носить броню, а броня будет носить солдата. В наибольшей степени продвинулась разработка роботизированных ног (рис. 11.4). На каждую ногу надевается гидравлический каркас с сенсорами, 40 датчиков которого улавливают напряжение и движение мышц, а солдат без специального технического инструктажа



Рис. 11.4. «Суперноги»
(часть скелетона)
[NEWSru.com]

марширует в 35килограммовом (пока!) экзоскелетоне, имея 24 кг выкладки, почти не ощущая их веса. Кроме режима ходьбы, предусмотрен режим бега. Создание экзоскелетов для плечевого пояса и рук, которые планируют объединить с экзоскелетом нижних конечностей, оказалось более сложной задачей.

Устройство ботинок позволит аккумулировать, а затем в нужный момент использовать часть энергии бега. Солдат или спасатель (именно спасатель, без бронезиления и шлема, изображен на рисунке 11.4) сможет

перепрыгивать через высокие и широкие препятствия, легко взбираться на стены и пр.

Дальнейшая миниатюризация экзоскелета прежде всего должна коснуться источника энергии, который пока занимает объемистый рюкзак.

Биодатчики в костюме солдата будущего

Разработка биочипов проводилась в рамках создания костюма солдата будущего, но, как многие другие, может быть использована в самых различных мирных целях.

В комплект снаряжения войдет специальная майка, в которую и будут вмонтированы сенсоры костюма. Они будут фиксировать основные физиологические параметры состояния человека: температуру тела, пульс, работу сердца и даже сколько воды он выпил (контроль ее расхода и предотвращение обезвоживания организма). Все эти сведения будут с помощью индивидуального медицинского компьютера передаваться на камеру, которая спроецирует информацию прямо на сетчатку глаз. В случае необходимости медицинский компьютер по данным датчиков сам заблокирует солдата в экзоскелете, включит нужные системы жизнеобеспечения (например, герметизирует костюм при попадании в опасную среду) и вызовет медицинскую помощь. Врач, находящийся в тысячах километров, контролирует этот процесс и отдаст нужные команды.

В защитной противобаллистической маске будет автоматически включаться воздушный фильтр, если датчики обнаружат опасные загрязнения или радиацию в воздухе.

Каждый солдат будет снабжен запасом питания и индивидуальной системой со специальным фильтром для очистки воды от всех примесей, вирусов и бактерий. Такая очистка возможна только на основе наночистот.

Связь

Защитный противобаллистический шлем солдата станет высокотехнологичной частью костюма и будет начинен устройствами, позволяющими получать информацию от его собственного организма, от других членов группы, центра управления. Все эти сведения, а также информация от приборов, заменяющих прибор ночного видения и бинокль, через проектор будут передаваться непосредственно на сетчатку глаз. Субъективно это воспринимается как 17дюймовый экран со множеством «операционных окон». На нем по желанию солдата может возникать изображение вида местности со всех сторон, в том числе сверху (от космического спутника или беспилотного воздушного аппарата). Проблемой

войн последнего времени, в том числе иракской, была потеря солдатами связи со своим подразделением. Теперь солдат сможет прямо на виртуальном экране шлема наблюдать цифровые карты местности, на котором светящимися метками будут обозначены его местонахождение, положение других солдат и «кибермулов», несущих часть снаряжения. На экран могут выводиться также изображения, полученные с помощью датчиков других бойцов подразделения. Шлем будет оснащен лазерной системой распознавания «свой-чужой»: маркеры на рукавах костюмов, видимо, будут представлять собой фотонные кристаллы. Специальная система глобального позиционирования, находящаяся в рюкзаке, позволила разработчикам назвать солдата 2020 г. «F16 на ногах», так как она столь же совершенна, как у самолета-истребителя F16. С ней невозможно заблудиться ни в пустыне, ни в джунглях. Постоянный контроль за расположением пехотинцев важен также для штаба, для динамичного построения боевых действий.

В целом основная идея информационной системы - превращение солдата в часть единой «Матрицы», боевой системы FCS. Эта же идеология применима для отрядов спасателей, космонавтов и других групп, действующих в экстремальных условиях.

Наносредства для защиты от химического и биологического оружия

Эффективные детекторы и средства защиты от химического и биологического оружия необходимы не только на войне, но и при охране общественных учреждений (больниц, школ, аэропортов и пр.). Особенно это стало актуальным в связи с развитием международного терроризма. С помощью нанотехнологии созданы небольшие приборы, опознающие несколько видов опасных бактерий, токсины типа рицина. Компания «NanoScale Materials Inc» выпустила коммерческий продукт, нейтрализующий токсичные химикаты, а также препарат на основе фуллеренов, защищающий от проникновения в организм спор одной из самых распространенных в бактериологической войне бактерий. Ряд компаний выпускает защитные перчатки и кремы.

Проблемы, связанные с применением нанотехнологии в военном деле

Применение нанотехнологии в военном деле может привести к ряду новых проблем. Возможны изменения в расстановке сил, дестабилизация военного равновесия в мире [16*]. В настоящее время в Европе военные нанотехнологии разрабатываются в основном

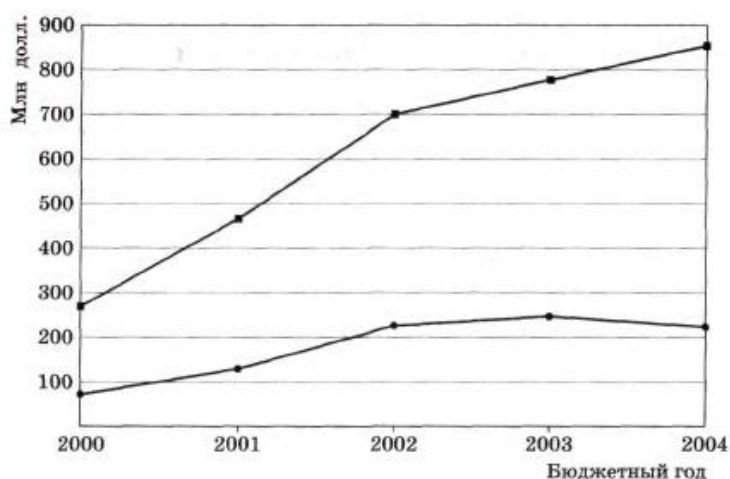


Рис. 11.5. Финансирование исследований ННИ США в целом и Министерства обороны [5]

в Англии, Франции (с ее традиционно высоким военно-промышленным потенциалом), Голландии. По разным оценкам, суммарное финансирование их разработок в этой области в 12-16 раз меньше, чем у США. На рисунке 11.5 приведены данные по финансированию в 2000-2004 гг. Национальной нанотехнологической инициативы (ННИ) США в целом и доли Министерства обороны. На 2008 г. Конгресс США утвердил военный бюджет в размере 459,3

млн долларов, из них на научно-исследовательские работы в области нанотехнологии - более 110 млн.

В Японии, соперничающей с США в области нанотехнологии, военная составляющая в финансировании не так выражена. Однако специфика нанотехнологии может позволить вырваться вперед неожиданным силам. Особенную тревогу в связи с этим вызывают террористические организации, тем более что многие разработки по нанотехнологии ведутся не на уровне государственных структур, а частными фирмами.

Наряду с вопросами, связанными с применением традиционного биологического оружия, обсуждаются вопросы безопасности использования имплантатов в животных и человека. Такие имплантаты для солдат могут быть источником повышения физических и умственных возможностей (например, возможность обходиться без еды и питья в течение недели за счет вмешательства в метаболизм). Такие разработки, как «костюм скорпиона», будут полезны для ряда мирных применений. Однако целенаправленное создание имплантатов для животных, которые вместе с генной инженерией позволят использовать их в военном деле, представляет большую опасность.

Относительно биологического, химического, ядерного оружия существует ряд международных соглашений. В связи с развитием военных приложений нанотехнологических разработок требуется создание аналогичной международной системы контроля и запретов [16*].

Вопросы для самоконтроля

1. Какие устройства в «костюме скорпиона» и их функции можно применить в костюмах спасателя, пожарника, геолога, биолога наблюдателя?
2. Какие достижения нанотехнологии используются в проекте «костюм скорпиона»?
3. Что такое экзоскелет и как он действует?
4. На чем основан камуфляж «хамелеон» и почему он так назван?

Задания

1. Вместе со школьниками младших (7-8) классов оформите стенд о костюме для войны и «экстремальных» работ. После демонстрации стенда младшим классам организуйте проведение конкурса рисунков «геолог будущего», «космонавт», «спасатель», «биолог-наблюдатель диких зверей», «рабочий химического завода» и пр. Найдите другие мирные специальности, в которых можно использовать отдельные системы костюма или их сочетания.
2. Напишите рецензию, изложив письменно и коротко свое мнение по данному материалу.

Литература

1. Аксенов П. Оружие: Голубая мечта Доналда Рамсфелда. <http://www.lenta.ru>
2. Петров Н. Американский солдат будущего: ядерный скальпель, «костюм скорпиона», подключение к «Матрице». <http://www.strana.ru>
3. Золотое Е. Универсальный солдат // Компьютерра. 2001. №16.
4. Свидиненко Ю. Экипировка солдата будущего, <http://www.podrobnosti.com.ua>

Занятие 13.

Лекция: Перспективы и проблемы нанотехнологии

В конце XX в. стала очевидной неизбежность развития нанотехнологии и наступления третьей научно-технической революции. Между технически развитыми странами и мощными техническими корпорациями началось соревнование за будущее господство в различных областях техники, медицины, военного дела. Ситуацию характеризует высказывание известного физика, одного из создателей водородной бомбы, Э. Теллера, что тот, кто раньше овладеет нанотехнологией, займет ведущее место в техносфере будущего.

Первой в нанотехнологическую «гонку» вступила Япония (до 2003 г. она по финансированию нанотехнологии опережала США), затем США, страны Европейского сообщества. В последние годы резко вырвался вперед Китай, рассматривающий развитие нанотехнологии как важную составляющую своей стратегии экономического развития.

В США более половины фирм, производящих товарную продукцию, делают ставку на использование нанотехнологии. Большие корпорации, такие как «HP», «Siemens», «Samsung», имеют собственные исследовательские группы.

Полагают, что активный дележ мирового рынка нанотехнологии в основном завершится к 2010-2015 гг.

По прогнозам американской ассоциации «National Science Foundation», в ближайшие 10-15 лет предполагаются следующие технические достижения в области нанотехнологии:

- промышленное производство нетрадиционными способами новых материалов даст рыночный объем в 340 млрд долларов;
- в полупроводниковой промышленности объем нанотехнологической продукции достигнет 300 млрд долларов;
- в фармацевтической промышленности около половины продукции будет определяться нанотехнологией, это составит примерно 180 млрд долларов;
- наноструктурные катализаторы - до 100 млрд долларов;
- рынок авиакосмических продуктов - 70 млрд долларов;
- экономия в сфере использования энергии света составит 10%, в долларах это эквивалентно экономии в 100 млрд, и сократит выброс углекислого газа в атмосферу в размере 200 млн тонн.

Грандиозные достижения в сфере здравоохранения и расширения физических и интеллектуальных возможностей человека обсуждались в главе 9. В области сельского хозяйства и защиты окружающей среды применение нанотехнологии увеличит урожайность, поможет контролировать качество продуктов, создаст новые пути снижения загрязнения окружающей среды. В будущем на нанофабриках любые предметы, в том числе первой необходимости, будут собираться без отходов. В ближайшие 20 лет на массовый рынок выпустят устройства памяти в один терабайт (что эквивалентно объему Библиотеки информации Конгресса США или Ленинской библиотеки в Москве) объемом 1 см³ и процессоры с частотой 1000 терафлопс.

Сейчас нанотехнология применяется в производстве не менее 80 групп потребительских товаров и свыше 600 видов сырьевых материалов, комплектующих изделий и промышленного оборудования.

Первоначально устройства нанотехнологии будут интегрированы в уже имеющиеся приборы и конструкции, постепенно вытесняя отдельные их блоки.

Основную проблему для нашей страны составляет переход от научных лабораторных исследований к экономически выгодному промышленному производству. В то время как в мировой практике венчурные инвестиции являются самыми доходными, в России пока мало частных компаний и лиц решаются инвестировать средства в нанотехнологию. В июле 2007 г. Госдума РФ приняла закон «О Российской корпорации нанотехнологий».

Как и две предыдущие научно-технические революции, «нанореволюция» является закономерным следствием ряда объективных причин. Во-первых, наука и техника вышли на наноуровень в изучении и использовании материи. Во-вторых, все острее стоит проблема загрязнения земли, воды и воздуха, а теперь уже и космоса. Решить эту проблему можно за счет альтернативных источников энергии, энергосберегающих и экологически чистых процессов и устройств. Так, применение фотонных кристаллов и светодиодов позволит резко сэкономить на освещении. Существенным фактором атмосферного загрязнения являются автомобили. Уменьшение их массы за счет применения нанокompозитов поможет сократить расход топлива. Переход на экологически чистое водородное топливо, безопасно заключенное в углеродные нанотрубки, также существенно снизит загрязнения окружающей среды. Возможный переход к оптическому компьютеру уменьшит электромагнитное воздействие на окружающую среду. Наконец, сам переход к безотходной технологии «снизу вверх» предполагает уменьшение экологических проблем.

Всякая новая технология и новые достижения науки вместе с улучшением жизни человека создают новые проблемы и опасности (достаточно вспомнить атомную энергию).

Будущий «нанорай» омрачен или усложнен по меньшей мере четырьмя проблемами и опасностями.

1. Развитие нанотехнологии приведет к ряду социальных проблем. Об этом писал уже Э. Дрекслер, отметивший, что создание технологии производства репликаторов может, например, способствовать деспотическим формам правления (организация слежки за населением, контроль тела и сознания и пр.).

Разные авторы употребляют этот термин в единственном или множественном числе.

Наноустройства для перехвата информации могут стать проблемой не только для коммерческих организаций и военных, но и для отдельных граждан.

Может усилиться социальное неравенство, особенно на первых стадиях внедрения достижений нанотехнологии, скажем, в медицину, когда стоимость новых лекарств и методов будет еще достаточно высока. Заметим, что при этом усугубятся некоторые моральные проблемы, существующие уже в современной медицине. Новые моральные проблемы возникнут также при применении нанотехнологии в военном деле (например, при применении специальных трансплантатов в военных целях для людей и животных).

Значительное увеличение продолжительности жизни за счет наномедицины вызовет необходимость пересмотра пенсионного законодательства.

2. Возникнут новые политические и экономические проблемы.

Прогнозируется, что развитие нанотехнологии может существенно изменить баланс сил между государствами в экономической или военно-политической области.

Высказываются опасения по поводу усиления на фоне научно-технической революции роли крупных корпораций по сравнению с ролью государства и большими возможно-

стями их «закрытости» от общества.

В связи с использованием нанотехнологии в военных целях потребуется развитие новых форм международного контроля за вооружением и антитеррористического контроля. Вместе с тем именно достижения нанотехнологии в области наносенсорики позволят повысить степень безопасности, эффективно контролируя малейшие следы отравляющих и биологических веществ, наркотиков, взрывчатых и радиоактивных веществ.

Международное сотрудничество потребуется при решении некоторых глобальных задач, например создания космического лифта или квантового компьютера.

3. В промышленности увеличится доля наукоемкой продукции, что потребует увеличения числа высококвалифицированных работников. Предполагается, что к 2015 г. в области нанотехнологии будет создано 2 млн дополнительных рабочих мест. В связи с этим придется решать ряд проблем, связанных с образованием, причем не только в конкретной профессиональной области. Соответственно потребуется разработка новых подходов к обучению специалистов в области нанотехнологии на всех уровнях, развитие системы переподготовки кадров. Вместе с тем может возникнуть безработица для малоквалифицированных рабочих.

4. Экологические проблемы связаны прежде всего с влиянием нанопродуктов и наноустройств на человека. Здесь не идет речь о предельных случаях генетических изменений человека и вмешательств в его метаболизм. Обоснованные опасения высказываются по поводу высокой химической активности наночастиц, которые могут на производстве и в потребительской сфере попадать в легкие, кровь, на кожу. Наночастицы могут случайным образом повлиять на животных, на растения. Наконец, они могут оказаться аллергенами для некоторых людей. Эта область пока мало исследована. Некоторые выводы по результатам испытаний о негативном воздействии фуллеренов и нанотрубок оказались методически неверными: неизвестно, повлияли на испытуемых рыб и мышей именно наночастицы или сопутствующие им загрязнения, в том числе металлы. Кроме того, их вводили подопытным животным внутрь насильственным образом. Во всяком случае, в этой области предстоит тщательная и длительная работа. Конгресс США принял закон, обязывающий правительство изучить возможные формы воздействия продуктов нанотехнологии на общество, окружающую среду и здоровье человека. На слушаниях в Комитете по науке палаты представителей Конгресса США не только сторонники экологического движения, но и представители промышленных корпораций высказались за отчисление на исследования экологического и медицинского аспектов применения нанотехнологии от 10 до 20% государственных затрат на эту область в целом.

Широко обсуждается еще одна проблема, которую Э. Дрекер назвал проблемой «серой слизи». Речь идет о возможной потере контроля над наноассемблерами, которые начнут при этом безудержно размножаться, все вокруг превращая в другие ассемблеры. Подобная ситуация обыграна в ряде фантастических произведений, что в массовом сознании испортило репутацию нанотехнологии. Однако решение этой проблемы не является столь сложной, особенно по сравнению с основной проблемой создания ассемблеров.

Нанотехнология принципиально изменит жизнь человечества, создаст для каждого человека новые перспективы не только в области бытовых удобств, но и в области здоровья. Положительное влияние нанотехнологии на все сферы человеческой жизнедеятельности, несомненно, перевешивает те опасности, которые сопутствуют ее конкретным при-

ложениям и которые требуют конкретных предосторожностей.

Для внедрения достижений нанотехнологии, для развития научных исследований в этой области огромную роль играет психологический фактор. Первый этап развития любой принципиально новой технологии неизбежно вызывает скептицизм с самых разных сторон, в том числе со стороны других, в целом достаточно квалифицированных, специалистов. Известный специалист в области внедрения биотехнологий Дж. Голлвас [22*] приводит пример, как Национальный институт здоровья США отверг заявку двух молодых исследователей на грант, посчитав их проект слишком амбициозным и не имеющим практической ценности. Однако вскоре их работы привели к созданию универсального метода производства белков (в том числе инсулина человека) в бактериях-носителях, и в настоящее время объем производства соответствующих фармацевтических продуктов оценивается в миллиарды долларов.

На отношение к нанотехнологии может отрицательно повлиять также ее агрессивная реклама, отмечает П. Коффи, один из ведущих экспертов в области научно-технического развития [22*]. В то же время фирмы производители должны учитывать фактор консерватизма потребителей, с которым до этого они уже сталкивались при внедрении полупроводниковой техники. Нанотехнология - это не только научные и технические достижения. Третья научно-техническая революция, основу которой составляет нанотехнология, знаменует собой принципиальные изменения в познании мира и во взаимодействии различных научных дисциплин и разных отраслей промышленности. Нанотехнология - в принципе меж или, скорее, наддисциплинарное направление развития науки и техники. Она объединяет физику, химию, биологию, информатику, когнитивные науки.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему государства и частные корпорации вкладывают все большие средства в развитие нанотехнологии?
2. Какие проблемы создаются с развитием нанотехнологии?
3. Как можно решать проблему «серой слизи»?

Задания

1. Оформите стенд по прогнозам достижений нанотехнологии в ближайшие годы.
2. Подготовьте популярный доклад для младших классов по вопросам нанотехнологии, которые вас заинтересовали больше всего.

Литература

1. Алфимов С. М. и др., Развитие в России работ в области нанотехнологии. www.microststems.ru/files/publ/753.htm
2. Головин Ю. И. Нанотехнологическая революция стартовала!//Природа. 2004. № 1.
3. Бобровский С. Сколько же места там, внизу?//PC Week/ RE № 44-45. 2003. <http://pcweek.ru>
4. Новая нанопрограмма РФ. <http://www.Silicon Taiga>.
5. Оликевич А. А. Эволюция деловой разведки и контрразведки в эпоху нанотехнологии. www.agentura.ru/press/about/jointprojects/confident/nano/
6. Свидиненко Ю. Г. Как сделать нанотехнологии надежными? <http://www.nanonewsnet.ru>
7. Нанофинансирование нанотехнологии в России / под ред. С. Т. Корецкой. <http://www.perst.issph.kiae.ru>


Итоговые задания

1. Пользуясь материалом всех глав, приведите примеры самоорганизации наноструктур и наноматериалов. Какое значение имеют процессы самоорганизации в нанотехнологии? Подготовьте проект по этой проблеме.
2. Пользуясь материалом всех глав, приведите примеры взаимодействия нано и биотехнологии. Подготовьте соответствующий стенд.
3. Приведите примеры использования в нанотехнологии ДНК.
4. Подготовьте небольшую лекцию для младших (7-9) классов с использованием того материала курса, который вам наиболее интересным. Помогите им оформить соответствующий стенд.

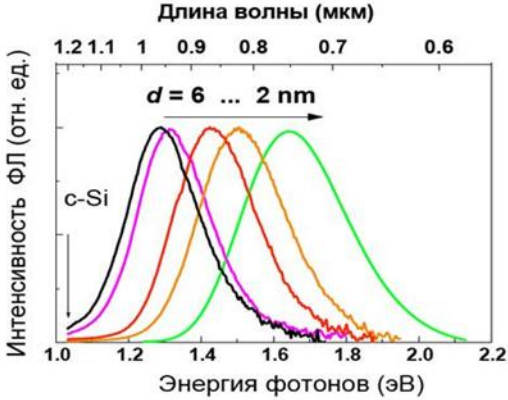
Занятие 14. Физические основы нанотехнологий
 (слайды из презентация)

Физические основы нанотехнологий

Уникальные свойства наноматериалов определяются квантово-размерными эффектами. Начиная с некоторого размера, на свойствах вещества начинают сказываться квантовые эффекты. Проявление этих эффектов зависит от размеров системы.



← Образцы наноструктурированного кремния



Длина волны (мкм)
 1.2 1.1 1 0.9 0.8 0.7 0.6

Интенсивность ФЛ (отн. ед.)

$d = 6 \dots 2 \text{ nm}$

c-Si

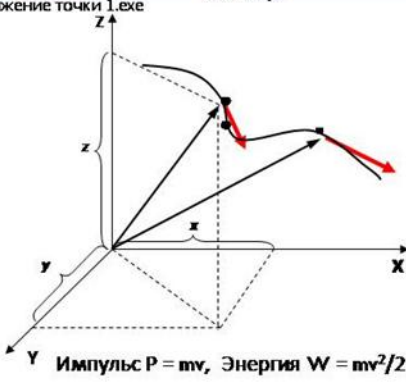
Энергия фотонов (эВ)
 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2

С уменьшением размеров нанокристаллов Si спектр их люминесценции сдвигается в коротковолновую область

Описание движения в классической механике

Частица

Движение точки 1.exe

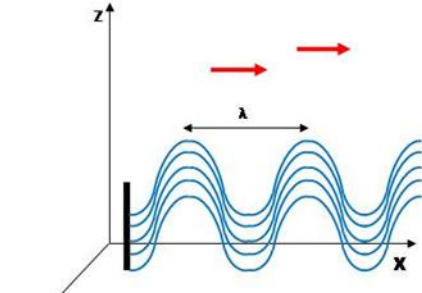


Импульс $P = mv$, Энергия $W = mv^2/2$

Зная уравнения движения $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, в любой момент времени, в каждой точке траектории можно определить значение координат, импульса и энергии частицы.

Волна

Модель волны.exe

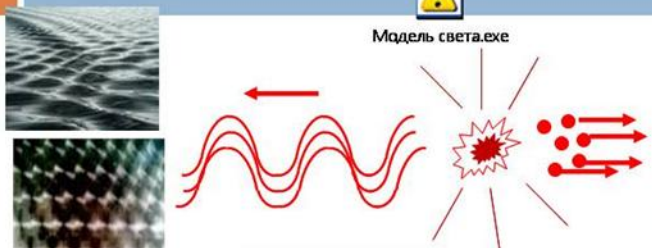


Длина волны $\lambda = v T$

Уравнение волны $y(x,t) = A \sin(\omega t - x/v)$ описывает распространение колебаний в пространстве. В любой момент времени каждая точка волны движется по своему, энергия волны распределена по всему пространству, занятому волной.

Корпускулярно-волновой дуализм света

⚠
Модель света.exe



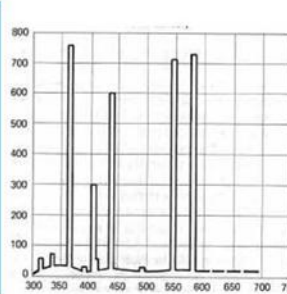
⚠

Доказательства волновой природы:

- Интерференция
- Дифракция
- Поляризация
- Дисперсия

Доказательства корпускулярной природы:

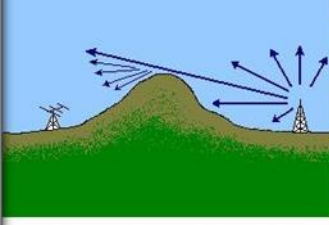

- Линейчатые спектры излучения и поглощения
- Фотоэффект



Интерференция и дифракция волн

⚠ Интерференция 1.exe
⚠ Дифракция.exe




Световые кванты: $E = h\nu$

призма
экран

Эмпирическая формула Ридберга

$$\nu_{nm} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Постоянная Ридберга
 $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$

Спектры атомарного водорода

← Спектр излучения
← Спектр поглощения

Гипотеза М. Планка: Тела излучают энергию света порциями - квантами. Энергия каждой порции строго определена и вычисляется по формуле: $E = h\nu$, где $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – квант действия или постоянная Планка

«... кроме атомистической структуры материи существует своего рода атомистическая структура энергии, управляемая универсальной постоянной h , введенной Планком. Это открытие стало основой всех исследований в физике XX века и с тех пор почти полностью обусловило ее развитие...»

А. Эйнштейн

Фотоэффект

Катод Анод
Падающее излучение
Фотозэлектроны

Александр Григорьевич Столетов (1839-1896)

а) $J_3 > J_2 > J_1$
 б) $\nu_3 > \nu_2 > \nu_1$

Законы Столетова:

1. Чем больше интенсивность падающего света, тем больше ток насыщения I_n .
2. Запирающее напряжение $U_{зп}$, определяемое максимальной кинетической энергией $\max W_k$ электронов, не зависит от силы света, но зависит от его цвета (частоты).
3. Есть «красная граница» фотоэффекта: предельная частота излучения, ниже которой фотоэффект не происходит.

Излучение падает на катод и выбивает из него электроны, которые под действием электрического поля летят к аноду, образуя ток в цепи (фототок). Ток насыщения I_n – максимальное значение фототока. Запирающее напряжение $U_{зп}$ – значение отрицательного анодного напряжения, при котором фототок прекращается.

$eU_{зп} = \max W_k = mv^2/2$, где e – заряд электрона, $\max W_k$ – его кинетическая энергия, m – масса электрона, v – его скорость

Квантовая теория фотоэффекта А.Эйнштейн, Нобелевская премия 1921г.

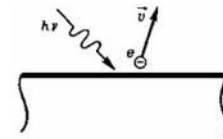
Уравнение фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{выл}} + \frac{mv^2}{2}$$

Энергия одного кванта света $h\nu$ расходуется на совершение работы по выходу электрона из металла $A_{\text{выл}}$, оставшаяся часть энергии кванта определяет кинетическую энергию вышедшего электрона $W_k = mv^2/2$. Чем больше квантов в потоке света, тем выше его интенсивность → тем больше электронов выбивается из металла (**первый закон Столетова**). Чем выше частота излучения, тем больше энергия одного кванта → тем больше кинетическая энергия вышедшего электрона (**второй закон Столетова**). Если частота излучения низка настолько, что энергия одного кванта $h\nu$ меньше работы выхода $A_{\text{выл}}$, электрон не может выйти из металла → фотоэффекта не происходит (**третий закон Столетова**, «красная граница фотоэффекта»).



А.Эйнштейн, 1879- 1955



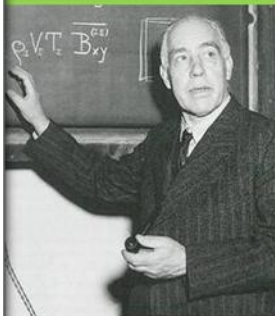
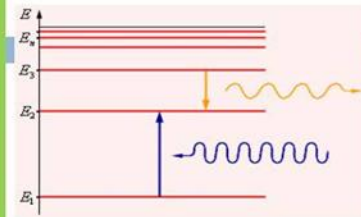
Минимальное значение частоты определяется из условия

$$mv^2/2 = 0, \text{ или } h\nu_{\text{min}} = A; \text{ откуда } \nu_{\text{min}} = A/h.$$

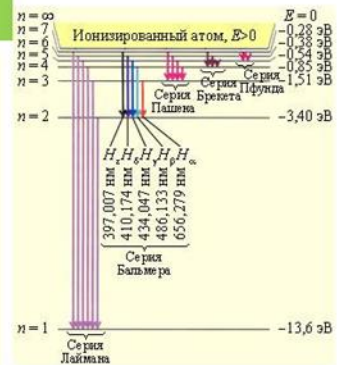
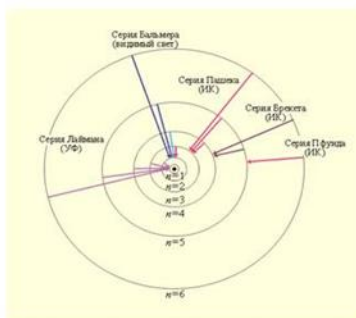
Модель атома водорода

Квантовые постулаты Бора:

1. Атом может находиться только в особых стационарных состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n . В стационарных состояниях атом не излучает.
2. При переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_n в другое стационарное состояние с энергией E_m излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний: $h\nu_{nm} = E_n - E_m$.



Н. Бор, 1885-1962



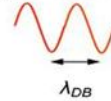
Волновые свойства частиц

Луи де Бройль: “корпускулярно-волновой дуализм”

частица – волна, волна – частица



?



Длина волны де Бройля:

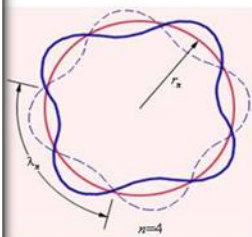
$$\lambda_{DB} = \frac{h}{p}$$

$h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка

p – импульс (для частицы: $p = mv$)

Например,

- 1) Свободный электрон $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг при $T_{комн} = 300$ К :
 $\lambda_{DB} \approx 3$ нм
- 2) Микроб с $m = 10^{-15}$ кг , $v = 1$ мкм/с : $\lambda_{DB} \approx 0.001$ нм



Каждая орбита в атоме водорода соответствует волне, распространяющейся по сфере около ядра атома. Стационарная орбита возникает в том случае, когда волна непрерывно повторяет себя после каждого оборота вокруг ядра. Другими словами, стационарная орбита соответствует стоячей волне де Бройля на длине орбиты. В стационарном квантовом состоянии атома водорода на длине орбиты должно укладываться по идее де Бройля целое число длин волн λ , т. е.
 $n\lambda_n = 2\pi r_n$

Описание движения в квантовой механике

Соотношение неопределенностей Гейзенберга:

Для координаты и импульса:

$$\Delta x \Delta p_x \geq h$$

! Размер волны не измерить точно на длинах: $\Delta x \geq h / \Delta p_x \geq \lambda_{DB}$

Для энергии и времени:

$$\Delta E \Delta t \geq h$$



! Энергию волны не измерить точно на временах, меньше периода волны : $\Delta t \geq h / \Delta E \geq 1/\nu = T$

$$E = E_0 + \Delta E$$

! Энергия частицы-волны не равна 0, даже если ее энергия покоя $E_0 = 0$!

Состояние частицы описывается волновой функцией: $\Psi(x, y, z, t)$

Вероятность Δw найти частицу в объеме ΔV :

$$\Delta w = |\Psi|^2 \Delta V$$


Энергия в классической и в квантовой механике

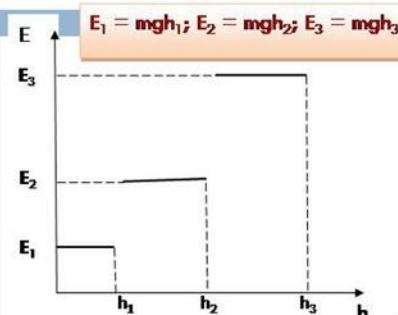


$E = mgh$



Энергия свободной частицы и в классической, и в квантовой механике может изменяться плавно. Энергия частицы, находящейся в силовом поле, в квантовой механике может изменяться только скачками (квантами)



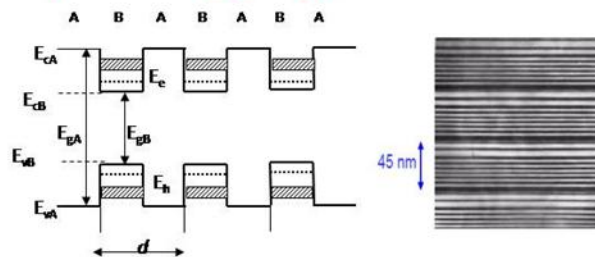


$E_1 = mgh_1; E_2 = mgh_2; E_3 = mgh_3$



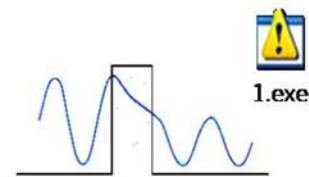
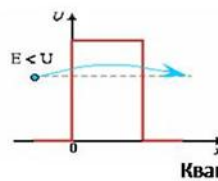
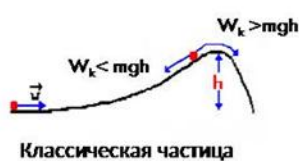
Энергия носителей заряда в квантово-размерных структурах

Сверхрешетки:
 структуры с вертикальным переносом



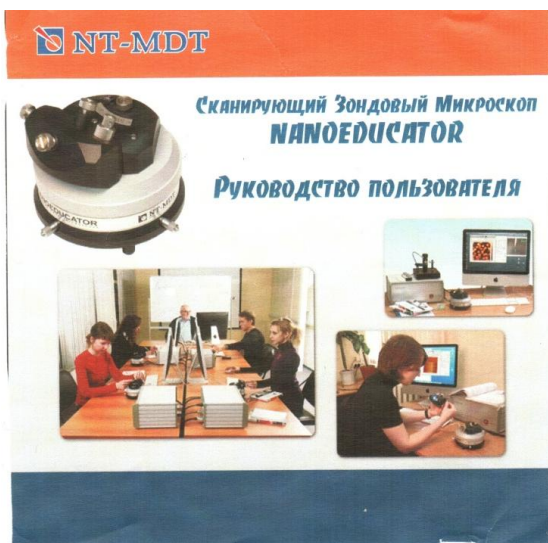
Энергетическая диаграмма сверхрешетки, состоящей из чередующихся слоев полупроводника А и В

Туннельный эффект: прохождение квантовой частицы через барьер при энергии частицы меньше высоты барьера: изменяется волновая функция, энергия не изменяется



Занятие 15. Сканирующий зондовый микроскоп «NANOEDUCATOR»

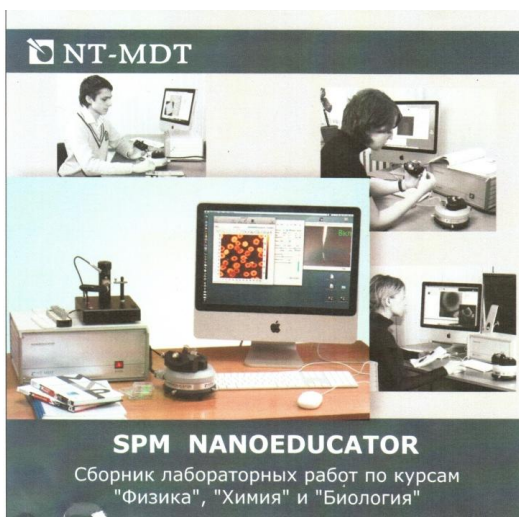
Мультимедийные пособия: Руководство пользователя сканирующим зондовым микроскопом «NANOEDUCATOR» (из 3 CD-диков)



Данный диск содержит руководство пользователя по работе со сканирующим зондовым микроскопом NANOEDUCATOR (алгоритм действий)



Данный диск описывает принципы действия сканирующего зондового микроскопа NANOEDUCATOR, алгоритм изготовления и заточки зондов



Данный диск содержит примерные варианты лабораторных работ для работы со сканирующим зондовым микроскопом NANOEDUCATOR

Занятие 16. Создание и защита проектов.

Презентация «Познаём наномир»
(данная презентация содержит список рекомендуемых тем
для учебно-исследовательских проектов учащихся)

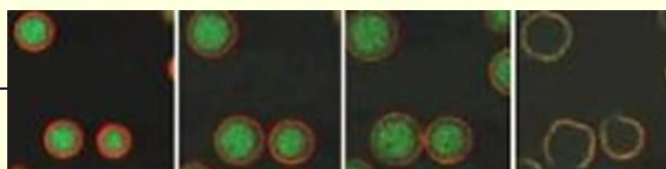


Необычные возможности в обычных технологиях



Лекарство в особой упаковке

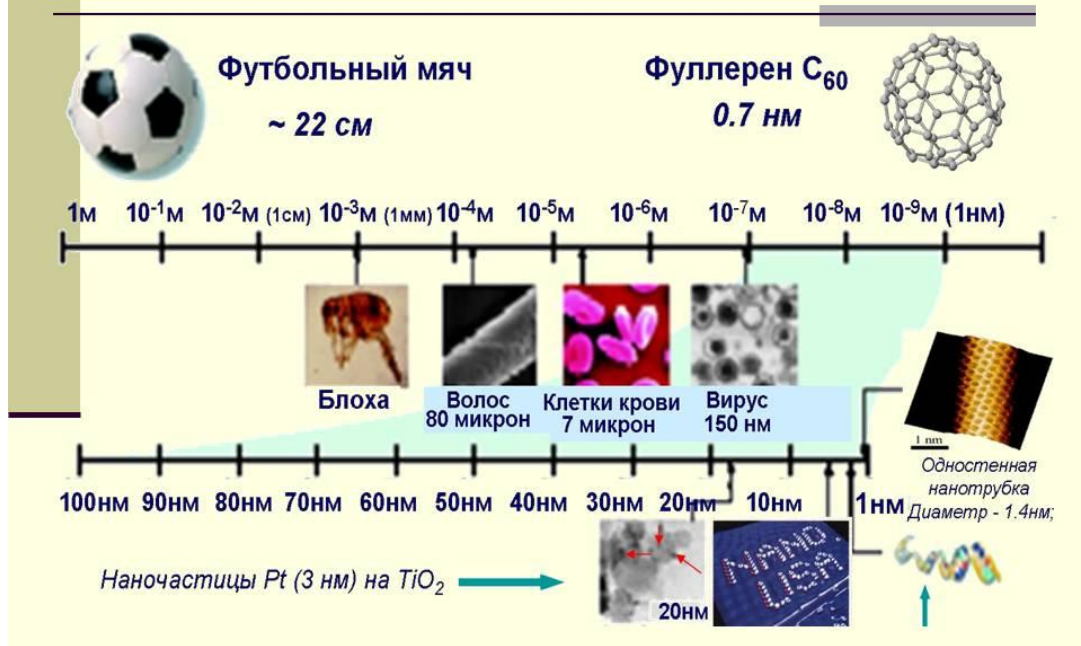
Капсула с лекарством саморазрушается за минуту: микрогель (зеленый) расширяется, заставляя оболочку из полиэлектrolита (красный) прорываться



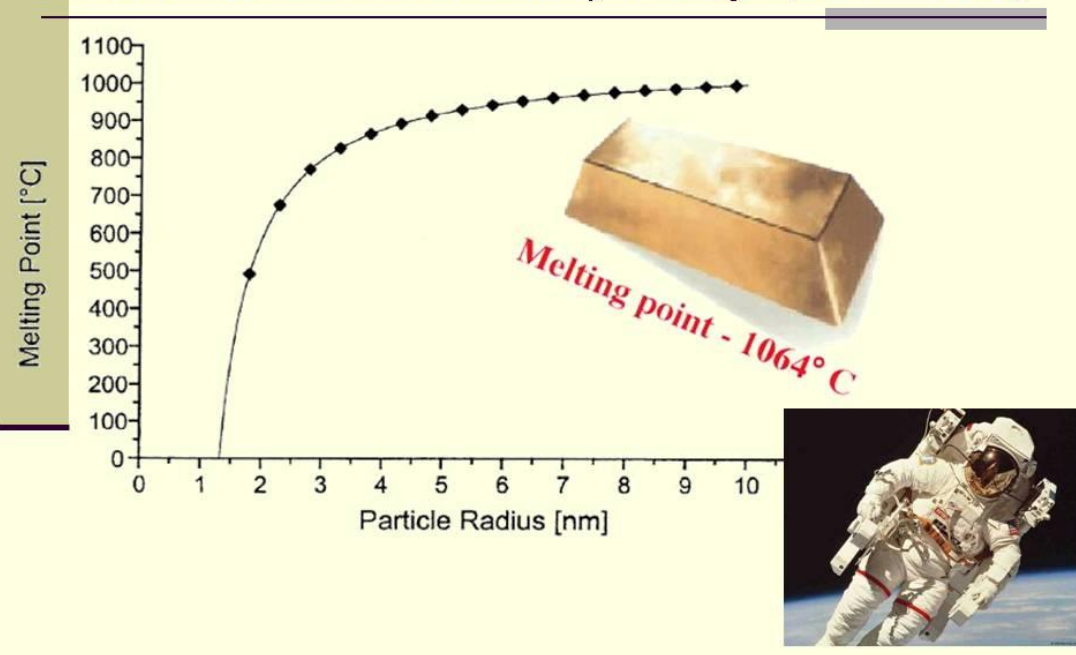
Многим из лекарственных молекул, например, пептидам, часто необходимы подходящие переносчики для безопасной транспортировки к целевым клеткам организма. Необходимость в переносчиках связана с защитой фармацевтических веществ от гидролитического разрушения, индуцируемого межклеточными ферментами. Главной темой в области доставки лекарств (**drug delivery**) сейчас является разработка микроскопических капсул, высвобождающих свое содержимое при доставке к конечной цели. В последнее время в качестве многообещающих кандидатов для биомедицинских приложений рассматривается новый тип капсул, состоящих из нескольких слоев полиэлектrolитов, разрушающихся в организме после использования.

Chem. Soc. Rev., 2007

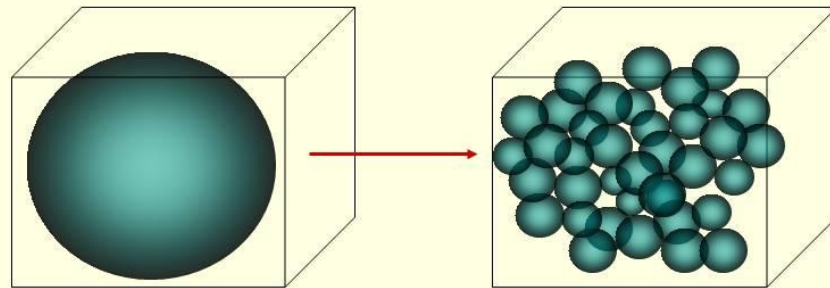
Сравнительный масштаб макро-, микро- и нанообъектов



Температура плавления золота в зависимости от размера наночастиц (по данным К.Ж. Клябунде, *Nanoscale materials in chemistry*. J. Wiley. New York. 2001)

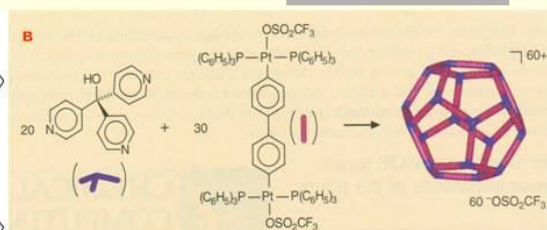
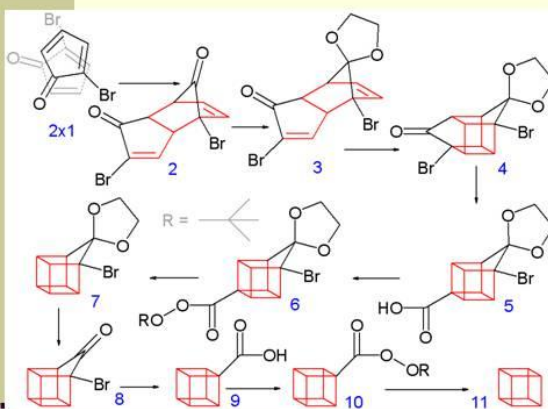


Увеличение поверхностной площади катализатора при дроблении материала



Количество атомов на поверхности наночастицы: 30 нм – 5%, 10 нм – **20%**, 3 нм – **50%**. Катализатор, состоящий из частиц размером 10 нм **в 100 раз активнее**, чем тот же материал, состоящий из частиц размером 1 микрон

Принцип «Lego» Самосборка и самоорганизация



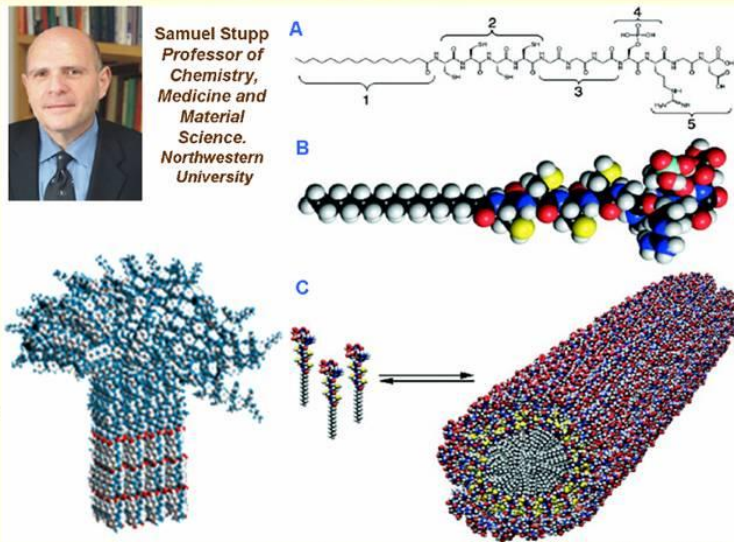
Не можешь
 позволить
 себе
 автомобиль?



Самосборка и минерализация пептидных волокон – материал для искусственной кости

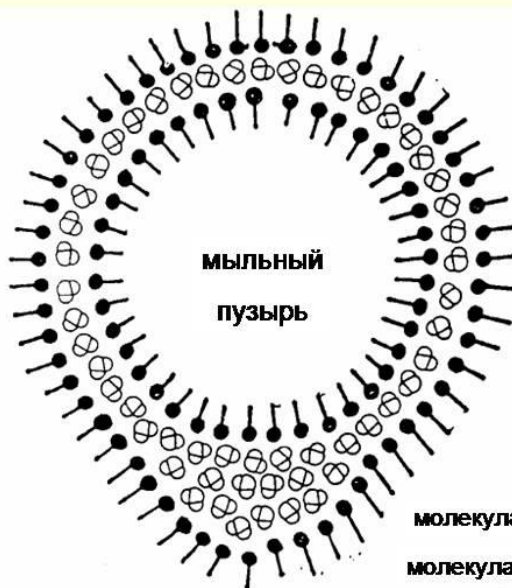


Samuel Stupp
Professor of
Chemistry,
Medicine and
Material
Science,
Northwestern
University



A – полипептид, содержащий неполярный гидрофобный (1) и различные полярные (2–5) фрагменты; **B** – агрегация; **C** – минерализация при добавлении неорганических солей

Мыльные пузыри имеют относительно сложное строение



молекула воды ⊗
молекула мыла ●

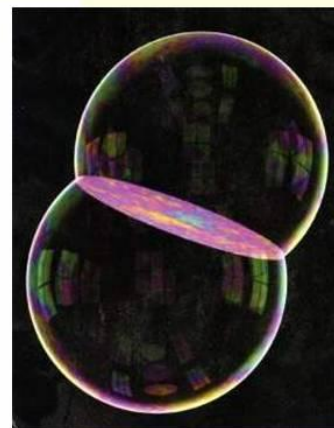


Схема строения
мыльного
пузыря

Масштаб оказывает сильное влияние на поведение веществ и материалов



Гравитация



Поверхностное натяжение

Легко ли
вылить воду
из
миниатюрной
чайной
кружки?



Простой эксперимент
(и набор для его проведения)
от NISE Network

NISE network
NANOSCALE INFORMAL SCIENCE EDUCATION



Проекты *Состав и структура*

Цели
Задачи
Гипотеза
Вводная часть
Что может потребоваться
Ход работы
(Таблица результатов)
Защита проекта
Выводы
Вопросы для размышлений
Литература и источники



Проекты

Создаем и изучаем малое



Измерение размеров малых тел
Что мы видим в микроскоп?

Самосборка
и самоорганизация

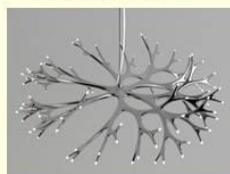
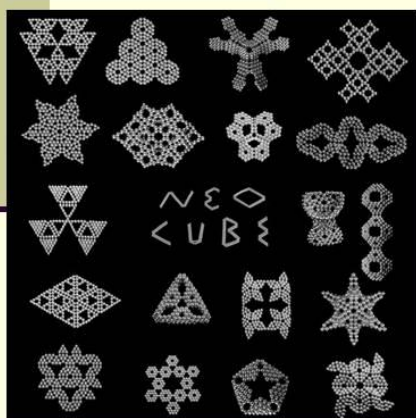
Магнитный кристалл

Пузырьковый кристалл

Ячейки Бенара

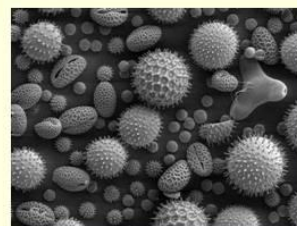
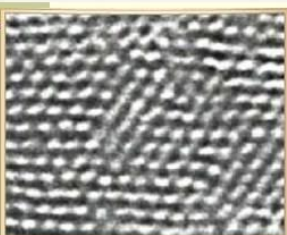
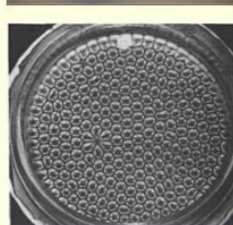
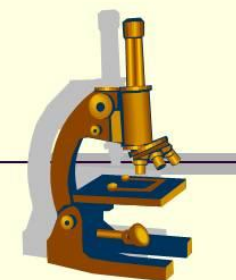
Металлические дендриты

Целлюлозные микроволокна



Проекты

Создаем и изучаем малое



Проекты

Создаем и изучаем малое



Литография на мраморе Управляем кристаллом ДНК – главная молекула биотехнологий и наномедицины

Состав нуклеиновых кислот

Взвешиваем ДНК

Собираем и разбираем ДНК

Материалы будущего

Фотонные кристаллы

Оптические волокна

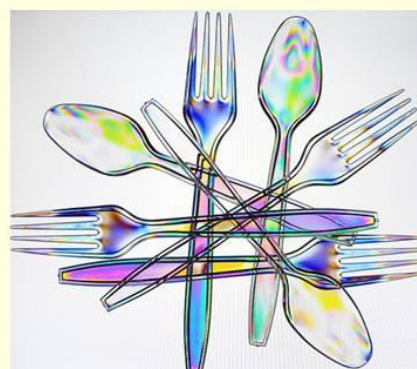
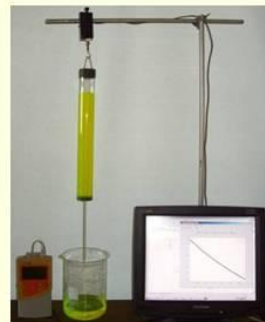
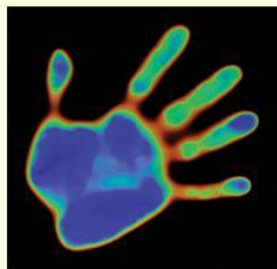
Прочные композиты

Системы «гость-хозяин»

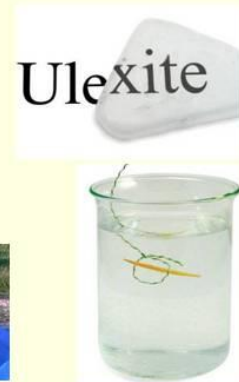
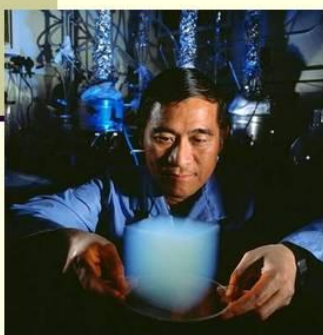
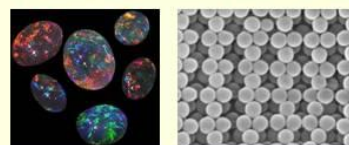
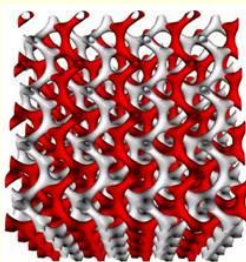


Проекты

Создаем и изучаем малое

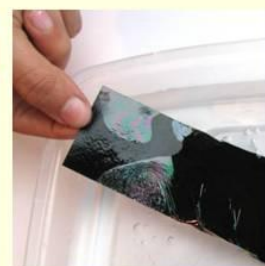
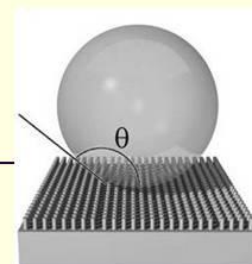


Проекты Создаем и изучаем малое



Проекты Эффект размера

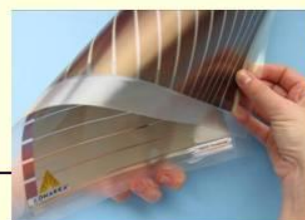
Поверхностные явления
Поверхностное натяжение
Смачиваемость. Эффект лотоса
Непромокаемая ткань
Контактное взаимодействие
Мыльные пузыри и цветные пленки



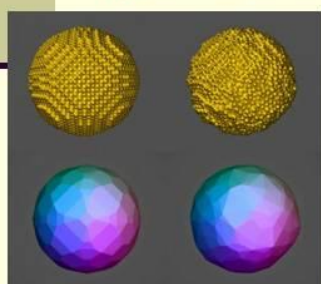
Проекты *Эффект размера*



Проекты *Эффект размера*



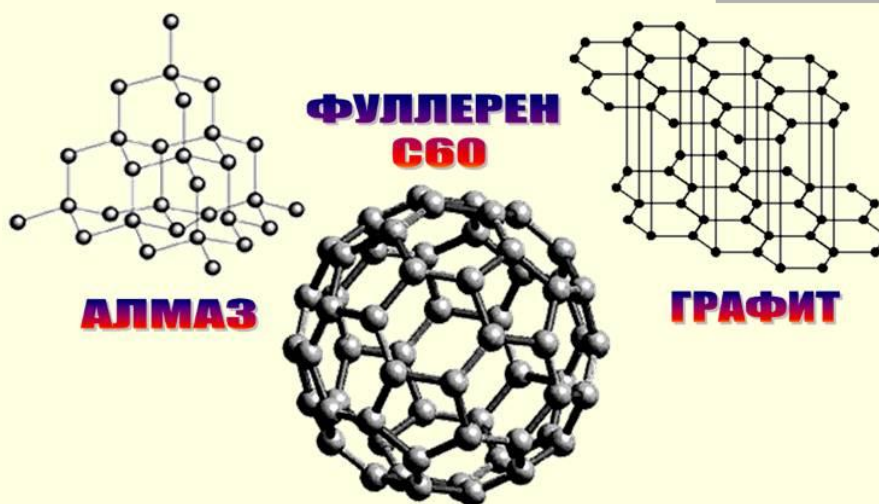
Металлическая пленка
Размерные эффекты в растворах
Пирофорные металлы
Магнитная жидкость
Разноцветное золото
Цветное стекло



Проекты *Эффект размера*



Углерод – в центре внимания нанонауки из-за большого разнообразия структур, которые можно создавать на его основе



← 0.71 нм →

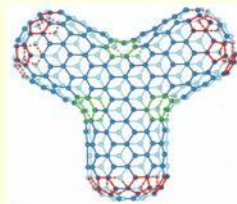
ДИАМЕТР ВНУТРЕННЕЙ ПОЛОСТИ – 0.44 нм

Аллотропные формы углерода

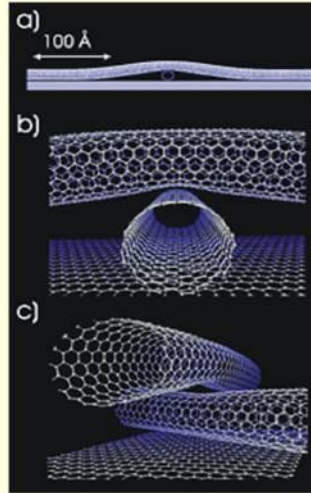
Углерод – в центре внимания нанонауки из-за большого разнообразия структур, которые можно создавать на его основе



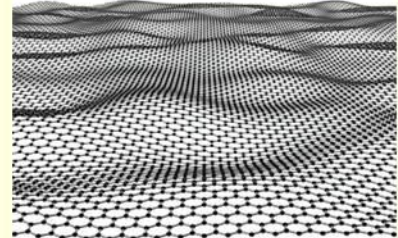
Спиральная нанотрубка



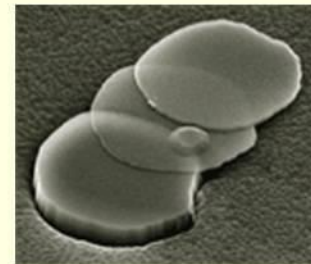
Y-соединение



Структуры из нанотрубок

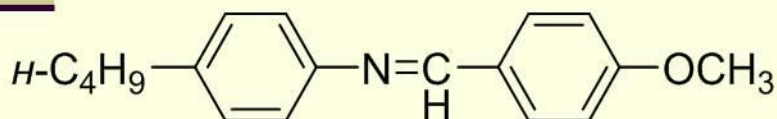
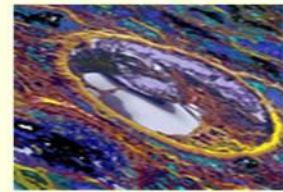
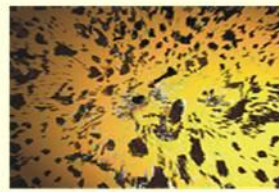
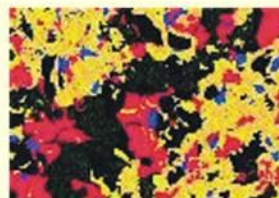


Графен и его широкие горизонты



Нобелевская премия по физике за 2010 год →

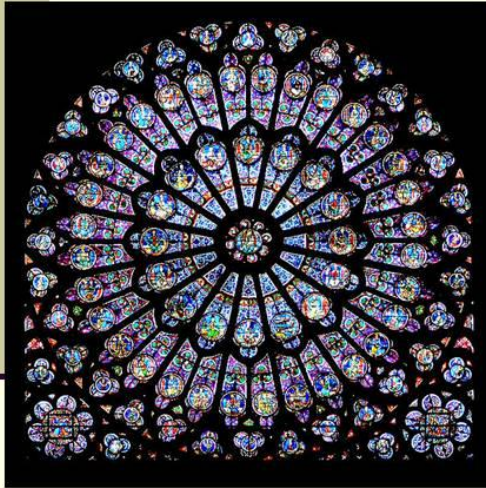
Жидкие кристаллы – особый тип самоорганизации вещества



Температура плавления **21 °C**,
температура просветления **47 °C**



Art&Science (наноарт): нанотехнологии в удовольствие



Витраж собора Парижской Богоматери

Современный наноарт



Кубок Ликурга, IV в., Британский музей



Нитинол – материал с эффектом памяти: медицина, космонавтика...

ГИММИ Руссланд Эндохирургия

Клипсы OVESCO

Клипсы OVESCO для эндоскопического одностороннего ушивания отверстий до 2 см в диаметре.

Система OTSC (Over-The-Scare Clipping) – Клипса Поверк Эндокопса

Область применения клипсы OVESCO

- лечение кровоточивый ЭКТ
- ушивание дефектов стенки ЭКТ
- ушивание отверстий доступа при NOTES

Схематическое описание процедуры:



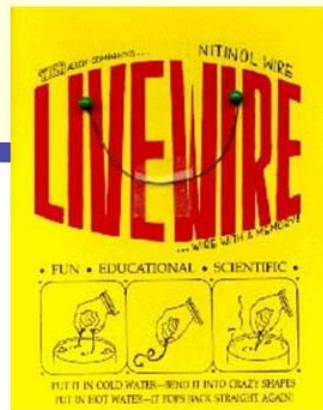
Позиционирование клипсы (первый шаг) Выдвижение аттритора, зажимание клипсы Выбоднение клипсы Клипса наложена, отверстие закрыто



OTSC клипсы выполнены из сплава Нитинол, имеющего свойства «памяти формы».

После сокращения с аттритора клипса смыкается на сведенных вместе краях отверстия.

Выпускаются в трапециевидном и атрапециевидном вариантах.



16.2. Положение об учебно-исследовательских проектах учащихся

I. Общие положения

Цель: выявление школьников, стремящихся к более глубокому познанию достижений в различных областях науки, техники, культуры, творчески одаренных детей и привлечение их к исследовательской и научно – практической деятельности.

Задачи конкурса:

- развитие интеллектуального творчества обучающихся;
- создание условий для демонстрации успеха учащимся, занимающимся учебно-исследовательской и экспериментально-опытной работой;
- повышение престижа и популяризация научных знаний;
- формирование открытой развивающей среды, создающей предпосылки к широкой дискуссии и свободному обмену мнениями.

II. Требования к работе

10.1. Работа не должна носить описательный характер, в ней должна прослеживаться самостоятельность автора в исследовании и собственные выводы.

10.2. Работы должны быть выполнены самостоятельно. Творческий проект выполняется индивидуально (не должен иметь соавторов).

10.3. Тематика проектов должна отражать приоритеты развития региона, территории. Формулировка темы должна ориентироваться на самостоятельные исследования по достаточно узкому вопросу. Исследование должно содержать элементы новизны, быть ориентировано на поисковое творчество, углубленное изучение рассматриваемого вопроса. Необходимо найти тему, которая исследована недостаточно или не рассматривалась под таким углом зрения. Из заголовка должно быть ясно, что является конкретным предметом исследования, круг рассматриваемых проблем.

10.4. Проблема, затронутая в работе, должна быть оригинальной. Если проблема не оригинальна, то должно быть оригинальным решение. Ценным является творчество, интеллектуальная продуктивность, генерация новых идей, может быть даже необычных, но обоснованных.

10.5. Исследовательский проект в обязательном порядке должен содержать практический раздел, основанный на собственных исследованиях автора.

Разработка проектов на основе заказа органов местного самоуправления, общественности усиливает значимость проекта.

10.6. Работа должна быть основана на достаточно широком количестве источников:

- литература (должны быть не школьные учебники, а научные, научно-популярные издания, справочная, мемуарная, документальная литература, материалы периодической печати, монографии и т.д.);
- документы, первоисточники, статистические данные и т.д.;
- материалы Internet (все они должны иметь точные ссылки: автор, название сайта и электронный адрес).

10.7. При оформлении исследовательских проектов должны быть соблюдены следующие требования:

- объем работы не более 30 печатных страниц (не считая списка использованной литературы и приложений) и не менее 20 печатных страниц (не считая списка использованной литературы и приложений);

- обязательно наличие сносок на использованную литературу и информационные источники. Сноски делаются внизу страницы (при использовании авторского текста исследователь должен обязательно сделать ссылку на источник). Допускается ссылка только на литературу, с которой автор непосредственно работал. Если в работе используются ранее

опубликованные архивные данные, делается ссылка на источник сведений, а не на архивы. Сноски делаются на конкретный номер страницы;

- нумерация страниц в правом нижнем углу. Титульный лист не имеет нумерации, оглавление начинается со страницы 2.

10.8. Требования к тексту:

Весь текст выполняется на стандартных страницах белой бумаги формата А4 (размеры: поля страниц: левое – 3 см, верхнее и нижнее – 1,5 см, правое – 2 см.). Текст печатается ярким шрифтом (размер шрифта – 14 кегель) через полтора интервала между строками на одной стороне листа, шрифт Times New Roman. Формулы, чертежи вписываются черной пастой (тушью), либо воспроизводятся на печатающем устройстве. Весь материал должен быть хорошо читаемым, представлен в печатном виде на русском языке.

10.9. Рукописные работы не принимаются. Работа должна быть написана грамотно, как в научном, так и в филологическом смыслах.

10.10. Содержание работы должно соответствовать заявленной теме.

10.11. Состав исследовательского проекта:

- Титульный лист содержит следующие атрибуты: (сверху вниз) Министерство общего и профессионального образования Свердловской области; Управление образования территории; название секции, на которой планируется защита проекта; тема проекта; фамилия, имя, отчество (полностью) автора (-ов); класс; образовательное учреждение, в котором учится исполнитель; фамилия, имя, отчество (полностью) и должность руководителя работы и (или) консультанта; образовательное учреждение, в котором работает руководитель (14 размер шрифта, шрифт Times New Roman); название населенного пункта; год выполнения работы (10 размер шрифта, шрифт New Roman).

- Краткая аннотация объемом не более 10 строк (60 знаков в строке с учетом пробелов), представляет собой краткое описание проекта на простом, понятном широкой публике языке с указанием элементов новизны проведенных исследований и полученных результатов. Краткая аннотация печатается на отдельной стандартной странице в порядке: стандартный заголовок, затем посередине слова «Краткая аннотация», ниже текст краткой аннотации.

Она должна содержать наиболее важные сведения о проекте, в частности, включать следующую информацию: цель проекта; методы и приемы, которые использовались в проекте; полученные данные; выводы.

Аннотация не должна включать списка литературы.

- Содержание (точное название глав, параграфов, разделов с указанием страниц);

- Введение (где обосновывается сущность проблемы, ее актуальность, аргументируется выбор темы, ее значимость, новизна, актуальность, ставятся цели и задачи работы, методика и объем исследования, делается анализ научной литературы, периодики по проблеме исследования, рассматривается история исследуемой проблемы и различные концепции по проблеме, обзор литературы, который должен носить не хронологический, а проблемный характер, раскрывая состояние вопроса по разным литературным источникам).

Теоретическая, (основная) часть: с обязательными элементами исследования учащегося. Исследование предполагает: самостоятельное изложение проблемы и ее исследования и должно содержать: методику исследования, содержание исследования, собственные рассуждения учащегося, доказательства, сравнения, интерпретацию фактов, анализ позиции автора, самостоятельные выводы автора, практическая значимость работы.

- Заключение (в нём подводятся итоги и обобщенные выводы по теме проекта).

- Список использованных источников и литературы оформляется в соответствии с правилами составления библиографического списка (документы, книги, статьи, справочная литература и др.) например:

Нейман Л.В. Анатомия, физиология и патология органов слуха и речи. М.: Просвещение, 1970. 184 с.

Ушакова Т.Н. Детская речь – ее истоки и первые шаги в развитии//Психологический журнал. 1999. Т. 20. №3. с. 59-69.

На Западе растет производство черной икры.

21 мая 2006//<http://www.vz.ru/newz/2006/5/21/34465.html>.

- Приложения (карты, схемы, графики, диаграммы, иллюстрации, фотографии и т.д.). В тексте могут присутствовать только графики и таблицы, рисунки, фото, диаграммы должны быть вынесены в Приложение. Таблицы нумеруются и подписываются в верхнем правом углу «Таблица №... «Название таблицы»»; рисунок подписывается под изображением «Рис. №... «Название рисунка»». Графики и диаграммы должны сопровождаться комментариями, быть четкими, иметь последовательную нумерацию в тексте, содержать единицы значений осей абсцисс и ординат. Таблицы должны иметь последовательную (сквозную) нумерацию в тексте.


- Если при выполнении работы были созданы компьютерные программы, то к работе прилагается исполняемый программный модуль на диске и описание содержания диска в печатном (приложение) и электронном виде.

- Отзыв научного руководителя о работе.

*Примеры презентаций ученических проектов,
ставших призерами муниципального тура НПК - 2012*

Муниципальное общеобразовательное учреждение
«Средняя общеобразовательная школа №23 с углубленным изучением
предметов естественнонаучного профиля»


Исследование поверхностей металлов и их сплавов методом атомно-силовой микроскопии



Меркушин Михаил
учащийся 10 «Б» класса

Нанотехнологии – основа технологической революции

Первая технологическая
революция - энергетическая.
Вторая технологическая
революция –
информационная.
Третья технологическая
революция –
нанотехнологическая.




Цель работы:

приобретение знаний о методиках,
используемых при сканировании объектов на
атомном уровне и получение практических
навыков при работе на сканирующем зондовом
микроскопе NANOEDUCATOR



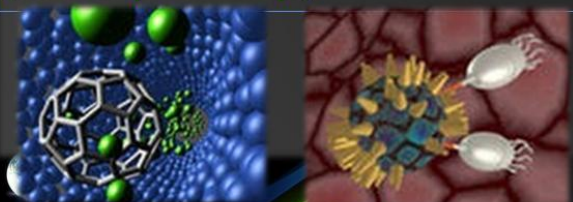
Задачи:

- получить представление о нанотехнологии,
- познакомиться с методами сканирующей зондовой микроскопии,
- изучить конструкцию и принципы работы прибора NANOEDUCATOR,
- получить изображения поверхностей металлов на наноуровне,
- изучить зависимости физических свойств металлов от структур поверхностей этих металлов.



Нанотехнология – это

область прикладной науки и техники,
занимающаяся изучением свойств объектов и
разработкой устройств размеров от 1 до 100 нм
(1 нанометр = 10^{-9} метра)



CALTECH

1959 год. Знаменитая лекция
Фейнмана, известная под названием
«Там, внизу, ещё много места»
считается стартовой точкой в борьбе за
покорение наномира.



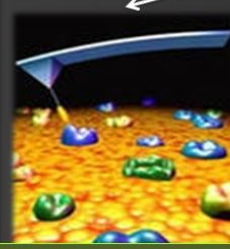
Сканирующая зондовая микроскопия

Процесс построения изображения основан на сканировании поверхности зондом. В общем случае позволяет получить трёхмерное изображение поверхности (топографию) с высоким разрешением.

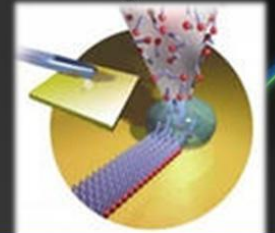


Платформа INTETRA, INTETRA Секстра

Сканирующая зондовая микроскопия

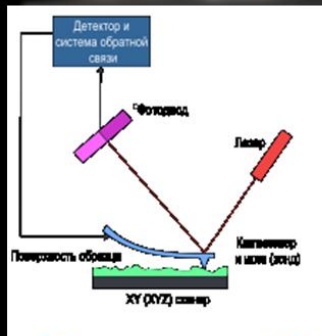


Атомно-силовая микроскопия



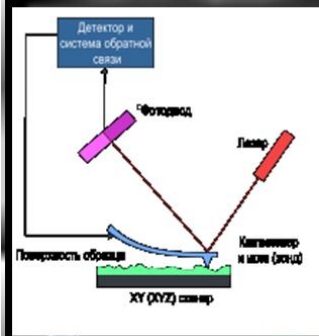
Сканирующая туннельная микроскопия

Атомно-силовая микроскопия –



метод, основанный на **неразрушающем контакте зонда (атомно-острой иглы) с поверхностью образца**

Атомно-силовая микроскопия –



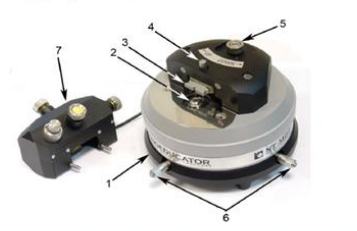
метод, основанный на **неразрушающем контакте зонда (атомно-острой иглы) с поверхностью образца**



В нашей школе в 10 классе введен элективный курс – **«Основы нанотехнологий»**. Слушатели курса стали участниками VI Всероссийской Интернет-олимпиады по нанотехнологиям, проводимой МГУ им. М.В. Ломоносова

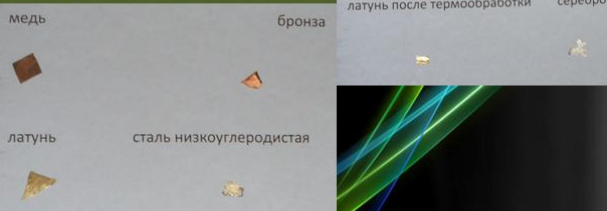
Устройство сканирующего зондового микроскопа

Конструкция СЗМ NanoEducator



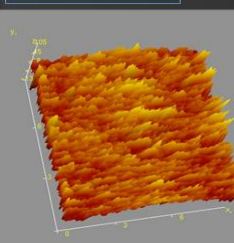
Внешний вид измерительной головки СЗМ NanoEducator
 1 – основание, 2 – держатель образца, 3 – датчик взаимодействия, 4 – винт фиксации датчика, 5 – винт ручного подвода, 6 – винты перемещения сканера с образцом, 7 – защитная крышка с видеокамерой

Для исследования взяты образцы стружки различных металлов и их сплавов, образцы подготовлены путем шлифовки



Получение изображений чистой меди и меди с примесями (бронза, латунь)

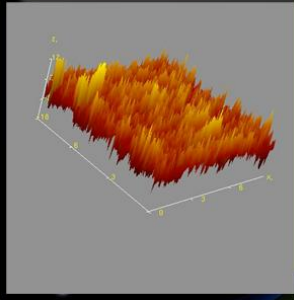
Медь



Структура материала представлена мелким зерном. На изображении видны небольшие возвышения, что может свидетельствовать о незначительных примесях в меди или о присутствии микроарации при шлифовке, поскольку медь обладает большой пластичностью и малой твердостью.

Получение изображений чистой меди и меди с примесями (бронза, латунь)

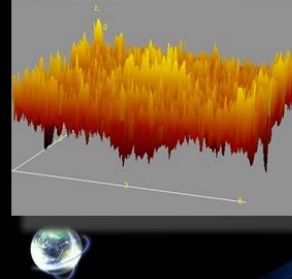
Бронза



На полученном изображении видно незначительное возращение возвышенностей, структура кристаллографической решетки по-прежнему имеет четкую направленность, хотя уже несколько перекрываются дефектами, и менее усредненную структуру.

Получение изображений чистой меди и меди с примесями (бронза, латунь)

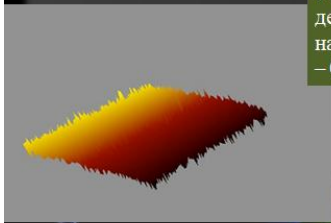
Латунь



Материал имеет неоднородную структуру, проявленную большим количеством возвышенностей и углублений. Наличие линейных дефектов связано с качеством обработки поверхностей, поскольку латунь – мягкий материал, и микротрещины образуются даже при «идеальной» шлифовке. Кроме того скан может свидетельствовать о включениях цинка, который имеет отличные от меди свойства.

Получение изображений поверхностей

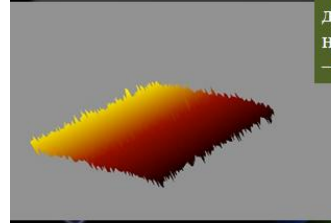
Сталь низкоуглеродистая



Структура поверхности ровная, дефектов и примесей не наблюдается (содержание углерода – 0,04%)

Получение изображений поверхностей

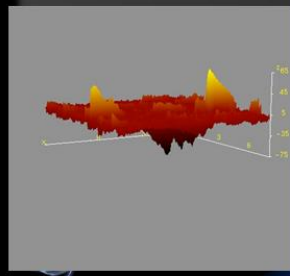
Сталь низкоуглеродистая



Структура поверхности ровная, дефектов и примесей не наблюдается (содержание углерода – 0,04%)

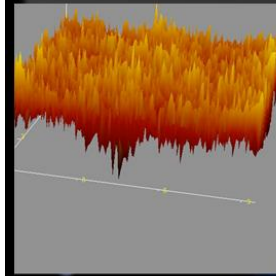
Получение изображений поверхностей

Сталь высокоуглеродистая



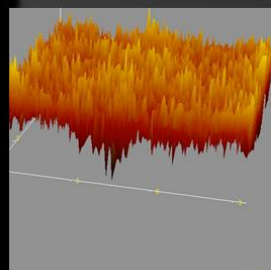
Подъемы свидетельствуют о наличии примесей. При увеличении содержания углерода до 1,2% возрастают прочность, твердость, электрическое сопротивление. При этом снижаются плотность, вязкость, пластичность, но при сканировании такой информации получить не удастся.

Получение изображения латуни, подвергшейся термообработке



Термическая обработка обеспечивает эффективный способ управления свойствами металла. На полученном изображении особых отличий не наблюдается. Возможно, такой результат получен оттого, что поверхности надо очищать химическим способом, а не механическим.

Получение изображения латуни, подвергшейся термообработке



Термическая обработка обеспечивает эффективный способ управления свойствами металла. На полученном изображении особых отличий не наблюдается. Возможно, такой результат получен оттого, что поверхности надо очищать химическим способом, а не механическим.

Выводы

В процессе выполнения работы я:

- познакомился с методами сканирующей зондовой микроскопии,
- изучил конструкцию и принципы работы прибора NANOEDUCATOR,
- получил навыки работы на СЗМ,
- сделал сканы поверхностей различных металлов, получил их изображения,
- нашел закономерности между структурой поверхностей металлов и их физическими свойствами,
- получил сведения о том, каким образом примеси и термообработка влияют на структуру поверхности металла,

Муниципальное общеобразовательное учреждение
 «Средняя общеобразовательная школа №23 с углубленным изучением
 предметов естественнонаучного профиля»

Что могут нанотехнологии?




Исполнитель:
 ученица 8 «А»
 Синичкина Валерия

Нанотехнологии – прорыв в будущее.
 Фейнман: «...физики могут научиться синтезировать
 любое вещество исходя из записанной химической
 формулы. Химики будут заказывать синтез, а физики –
 просто «укладывать» атомы в предполагаемом порядке»

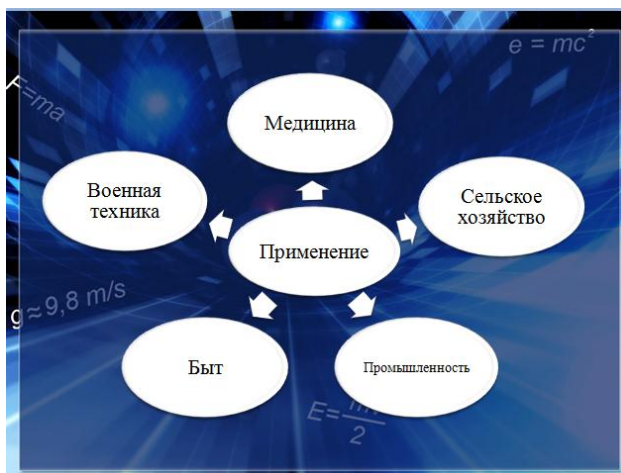


Цель:
 знакомство с
 нанотехнологиями и их
 применением, выяснение
 возможностей
 сканирующего зондового
 устройства
 «NANOEDUCATOR»



Задачи:

- изучить научно-популярную литературу по данному вопросу,
- познакомиться с основами сканирующей зондовой микроскопии,
- изучить конструкцию и принцип работы прибора «NANOEDUCATOR»,
- получить литографические изображения по собственным шаблонам.



Конструкция сканирующего зондового микроскопа NANOEDUCATOR



Внешний вид измерительной головки СЗМ : 1 – основание, 2 – держатель образца, 3 – Датчик взаимодействия, 4 – винт фиксации датчика, 5 – винт ручного подвода, 6 – винты перемещения сканера с образцом, 7 – защитная крышка с видеокамерой



ЛИТОГРАФИЯ (от греческих слов «lithos»-камень И «grapho»-пишу, рисую)
 была создана в 1798 году Адонизем Зенефельдером в Богемии.



Литография

← Наногравировка → Наночеканка



При выполнении процедуры литографии :

1. выбирается изображение – собственный шаблон, которое наносится на поверхность образца,
2. устанавливается величина максимально возможной глубины воздействия на образец: от 1000 до 2000 нм,
3. выбирается величина времени воздействия: 22 мкс,
4. устанавливается расстояние между точками изображения на поверхности образца (шаг литографии) – 100 нм.

Мой шаблон и изображение в 2D




Мой шаблон и изображение в 2D



Мой шаблон и изображение в 2D



Мой шаблон и изображение в 2D и 3D



ВЫВОДЫ:

- изучила основы сканирующей зондовой микроскопии,
- познакомилась с конструкцией и принципами работы сканирующего зондового микроскопа «NANOEDUCATOR»,
- научилась готовить шаблоны и литографию на твердых поверхностях,
- планирую повторить эксперимент Левши и написать свое имя на поверхности меньшего размера, чем у героя Лескова.

Спасибо за внимание!

